

## 분무간 충돌시스템에 대한 수치해석적 연구

고권현\* · 유홍선\*\* · 이성혁\*\*\*

### A Numerical Study on the Spray-to-Spray Impingement System

Gwon Hyun Ko, Hong Sun Ryou and Seong Hyuk Lee

**Key Words :** Inter-spray impingement(분무간 충돌), Wave model(Wave 모델), Atomization(미립화), Collision(충돌), Sauter Mean Diameter(Sauter 평균 직경)

#### Abstract

The present article deals with the numerical calculations for the inter-spray impingement of two diesel sprays under the conditions of high injection pressure. The Wave model involving the cavitation effect inside the nozzle was used for describing the atomization process. In particular, a hybrid model for drop collision was newly suggested in this study and compared with the O'Rourke's model, which has been widely used for diesel sprays. The impingement angles of 60 and 90 degrees were considered for simulation of non-evaporative diesel sprays. The calculated results for tip penetration were compared with experimental data and the Sauter Mean Diameter(SMD) characteristic was analyzed. It was concluded that the hybrid model slightly shows better agreement with experimental data than the O'Rourke's model. However, the more elaborate study should be needed for better understanding of spray-to-spray impingement phenomena.

#### 1. 서론

분무-분무충돌현상은 연소로 혹은 내연기관과 같은 많은 산업부분에서 미립화 증대 효과를 위해 응용될 수 있으며 액적간의 충돌에 의한 합착(coalescence)과 분열(separation) 등과 같은 물리적 현상을 이해하는 데에 도움을 줄 수 있다. 특히 직접분사식 디젤엔진내의 분무연료의 분포를 조절하는 데에 응용될 수 있는 가능성이 있으며 실제로 최근 Arai 등은 직접분사식 디젤엔진과 유사한 조건내에서 분무간 충돌현상을 연구함으로써 충돌 후 분무침투거리의 감소 및 액적크기의 감소 현상을 정량화한 바 있다<sup>(1),(2)</sup>. 그러나 아직까지도 분무간 충돌시 미립화 현상과 액적간 충돌현상에 대한

이해 혹은 정량적인 실험값들이 매우 부족한 실정에 있다. 또한 대부분의 연구들이 기초적인 현상 규명에 국한되어왔으며 분무간 충돌에 대한 수치해석연구는 매우 미진한 실정이다.

최근 들어 컴퓨터의 발달로 인해 분무거동에 대한 수치해석이 활발히 연구되고 있으며 3 차원 분무거동 계산이 가능하게 되었다. O'Rourke<sup>(3)</sup>는 액적간 충돌에 대한 현상을 통계적 방법으로 모델링하였으며 최근까지 많은 상용 혹은 인하우스 코드들에서 큰 무리없이 사용되어 왔다. 그러나 최근 들어 이 모델에 대한 문제점이 지적되면서 충돌모델에 대한 검토가 요구되고 있다<sup>(4)</sup>. 특히 본 연구에서 다루는 분무-분무 충돌현상에서는 액적들의 방향성에 의해 충돌여부 즉 충돌확률이 결정되어야 하기 때문에 방향성에 기인한 새로운 제약조건이 필요할 수 있다.

따라서 본 연구에서는 기존 공학부분에서 불문을처럼 사용되어오던 O'Rourke<sup>(3)</sup>의 모델에 대한 검토를 통해 새로운 충돌모델개발을 위한 기본적

\* 중앙대학교 기계공학과 대학원

\*\* 중앙대학교 기계공학과

\*\*\* 서울대학교 터보·동력기계연구 센터

인 자료를 제공하고 방향성에 개념을 도입한 혼합 충돌모델을 제안한다. 수치해석에 사용된 미립화 모델은 Reitz<sup>(5)</sup>에 의해 제안된 Wave 모델이며 노즐내의 공동현상<sup>(6)</sup>을 고려하였다. 한편 제안된 모델과 기존의 O'Rourke 모델<sup>(3)</sup>은 Chiba 등<sup>(2)</sup>의 실험 결과와 상호 비교되며 Sauter 평균직경(SMD)에 대한 정성적인 결과를 제시하고자 한다.

## 2. 수학적 모델링

### 2.1 이상유동 해석모델

본 연구에서 기상유동은 오일러리안 방정식을 사용하고 액상유동은 라그랑지안 방식을 사용하여 해석을 수행하였다. 적용된 난류모델은 Reynolds<sup>(7)</sup>에 의해 제안된 수정 k-ε 모델을 사용하였으며 기상은 지배방정식은 유한체적법에 의해 차분화되고 비정상유동 해석에는 PISO 알고리즘이 적용되었다. 또한 액적과 난류와의 상호작용항은 Gosman 과 Ioannides 의 모델<sup>(8)</sup>이 사용되었고 Reitz 의 Wave 모델을 사용하여 미립화 현상을 모사하였다. 이때 사용된 분열시간상수 B<sub>1</sub> 값은 10 으로 채택되었으며 노즐내의 유동에 의한 수력학적 미립화 현상은 Sarre<sup>(6)</sup>등의 공동현상모델을 사용하였다.

### 2.2 O'Rourke 의 액적간 충돌모델

앞서 언급한 바와 같이 본 연구의 주목적은 분무간 충돌현상 해석에에 미치는 충돌모델의 영향과 수정된 모델의 제안에 있다. 따라서 본 연구에서는 기존에 널리 적용되어온 O'Rourke 의 모델<sup>(3)</sup>과 방향성이 고려된 수정된 충돌모델을 사용하여 수치해석을 수행하였으며 각각의 모델은 다음과 같이 정리된다.

최근까지 수행된 대부분의 연구들에서 사용된 충돌모델로서 KIVA3V, FIRE 그리고 STAR-CD 와 같은 상용코드에 포함되어 있는 O'Rourke 의 모델은 수치해석과정에서 다음과 같은 가정에 의해 충돌여부를 결정한다.

*Two parcels may collide if and only if they lie in the same computational cell*

위의 조건이 만족하면 두개의 액적은 서로 충돌하며 이때 액적 하나가 다른 액적들과의 충돌하는 빈도와 충돌확률은 각각 다음과 같이 계산된다.

$$v = \pi(r_1 + r_2)^2 |U_1 - U_2| E_{12} N_2 / \forall_{coll} \quad (1)$$

$$P_n = e^{-\bar{n}} (\bar{n}^{-\bar{n}} / n) \quad (2)$$

여기서  $\bar{n} = v\delta t$  이고 충돌이 발생하지 않을 확률은  $P_0 = e^{-\bar{n}}$  이다. 따라서 O'Rourke 의 모델에서는 두개의 액적이 동일 계산셀내에 존재하고 충돌확률이 비충돌확률,  $P_0 = e^{-\bar{n}}$  보다 크면 충돌이 발생한다. 액적이 충돌할 때 발생하는 여러 현상중에서 O'Rourke 의 모델은 크게 세 가지의 충돌영역-합착, 반발 그리고 분리-을 고려하였다. 각각에 대한 임계조건은 Table 1 과 같다. 각 영역에 대한 조건이 만족되면 충돌 후 액적의 크기 및 속도가 결정된다. 그러나 O'Rourke 의 모델은 Gavaises<sup>(9)</sup> 와 Nordin<sup>(4)</sup>등이 지적한 바와 같이 동일격자 내에 두개의 액적이 존재하는 경우를 충돌조건으로 적용하므로 격자크기에 대한 의존성이 발생함은 물론 액적의 방향에 따른 충돌확률을 효과적으로 예측하기 어렵다.

### 2.3 혼합모델의 제안

앞서 언급한 바와 같이 O'Rourke 의 모델<sup>(3)</sup>은 격자크기에 민감하며 본 연구에서 다루는 충돌분부의 경우 액적들의 충돌방향과 무관하게 충돌현상을 모사한다. 이 문제점을 해결하기 위해 Gavaise<sup>(9)</sup>는 격자의존성문제 해결을 위해 대수함에 근거한 새로운 충돌영역을 정의함으로써 충돌여부에 대한 조건을 제시하였다. 따라서 본 연구에서는 충돌방향을 고려하고 기존의 O'Rourke 의 모델에서 사용된 동일격자조건 대신 충돌영역에 대한 반경식을 새로 제안함으로써 혼합모델을 제시한다.

우선 Fig. 1 에서 볼 수 있듯이 직경이 서로 다른 액적이 충돌하는 경우 두개의 액적은 다음과 같은 임계충돌반경(critical radius for collision),  $R_{CRT}$ , 내에 존재할 때 충돌이 발생할 수 있다고 정의한다.

$$D_{1,2} \leq R_{CRT} = \frac{2(r_1 N_1 + r_2 N_2)}{N_1 N_2} \quad (3)$$

$$D_{1,2} = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 + (z_1 - z_2)^2} \quad (4)$$

여기서 하첨자 1 은 상대적으로 직경이 큰 액적(collector)을 나타내고 2 는 작은 직경의 액적(drop-let)을 나타낸다. 즉 기존의 O'Rourke 의 모델에서 사용된 동일셀 조건 대신 식 (3)과 (4)를 이용하여 충돌영역을 결정한다. 한편 현상적인 관점에서 충돌반경내에 존재하는 두개의 액적의 방향은 충돌조건에 있어서 매우 중요하다. 즉 1 차원적

인 관점에서 두개의 액적이 서로를 향해 이동하는 경우 충돌될 확률은 매우 높은 반면 서로 멀어지는 경우는 충돌될 확률이 매우 희박하다. 따라서 본 연구에서는 식 (3)과 (4)를 만족하는 액적들에 대해 속도방향을 고려하여 제안된 Nordin<sup>(4)</sup>의 조건을 사용함으로써 또 하나의 충돌조건을 다음과 같이 결정하였다.

$$U_{12}\Delta t > |X_2 - X_1 - (r_1 + r_2)| \quad (5)$$

$$\text{여기서, } U_{12} = (U_1 - U_2) \frac{X_2 - X_1}{|X_2 - X_1|} \quad (6)$$

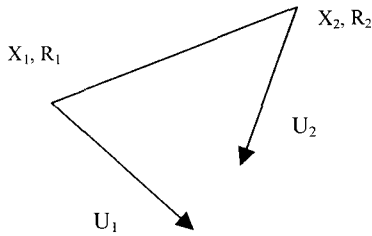


Fig. 1 Two parcels traveling towards each other

상기에서 언급한 두개의 조건을 동시에 만족하면 두개의 액적에 대한 충돌빈도와 비충돌확률  $P_0 = e^{-\bar{n}}$  을 계산하며 이후의 액적충돌영역에 대한 계산은 O'Rourke의 모델과 동일하다.

	Critical Condition
분리충돌 (Separation collision)	$ran(0,1) \geq E_{coal}$
합착충돌 (Coalescence collision)	$ran(0,1) < E_{coal}$ $ran(0,1) < E_{bounce}$
반발충돌 (Bouncing collision)	$ran(0,1) \geq E_{bounce}$ $ran(0,1) < E_{coal}$ $We_L < 2.12$

Table 1. Threshold conditions for collision regimes

### 3. 수치해석조건

#### 3.1 비증발 자유분무해석

본 연구에서는 해석코드 및 사용된 미립화모델에 대한 타당성 검증을 위해 비증발 자유분무해석을 수행하고 Allocca 등<sup>(10)</sup>의 실험결과와 상호 비교하였다. 사용된 연료는 Tetradecane 이며 분사압

력은 최대 98 Mpa 이고 노즐길이는 0.2 mm 이다. 17 기압의 질소 증으로 분사된 분무액적의 분무침투거리와 액적크기 등이 실험값과 상호 비교되었다. 사용된 미립화모델은 Reitz 와 Diwakar 모델<sup>(11)</sup>과 Wave 모델<sup>(9)</sup>이며 노즐내의 유동에 대한 영향을 조사하였다.

#### 3.2 분무간 충돌해석

예비해석에서 결정된 미립화 모델비교 결과를 통해 분무간 충돌해석은 공동현상을 고려한 Wave 모델을 사용하여 계산을 수행하였다. 본 연구에서는 디젤기관내의 현상과 유사한 조건내에서 분무간충돌실험을 수행한 Chiba 등<sup>(2)</sup>의 결과에 기초하여 수치해석을 수행하고 충돌각의 변화에 따른 분무침투거리 및 액적크기를 분석하였다. 또한 기존의 O'Rourke의 모델과 본 연구에서 제안한 혼합모델을 상호비교함으로써 액적간 충돌모델에 대한 성능을 비교하고 이후 모델개발을 위한 이론적 자료를 제공한다. 계산에 사용된 격자는 Fig. 2와 같으며 52×52×52 로 구성되어있다. 분사된 총 액적수는 3000 개이며 시간단계는 20μs 로 채택되었다. 한편 분사초기 분무각 및 분사속도는 노즐유동모델에 의해 결정된다. 우선 연료는 경유를 사용하고 기상의 압력은 10 기압으로 유지된다. 0.25 mm의 단공디젤노즐을 사용하였으며 충돌각은 노즐축으로부터 60 도와 90 도로 결정하였다. 한편 분사압력은 196 기압으로 유지된다.

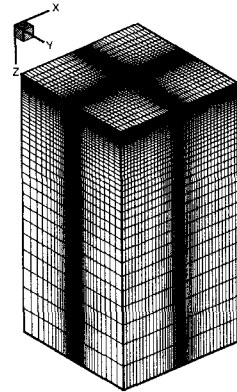
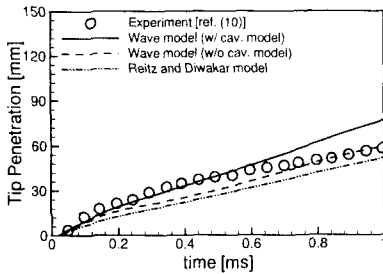


Fig. 2 Computational Grid System

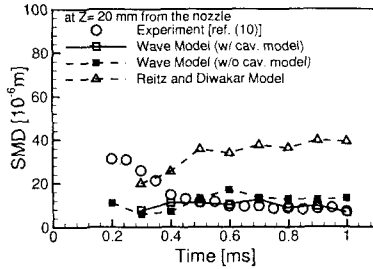
### 4. 결과 및 고찰

#### 4.1 단일 분무거동에 대한 해석(예비적 해석)

본 연구에서는 우선 해석에 사용된 미립화모델에 대한 타당성 확보를 위해 단일 분무에 대한 예비해석을 수행하였다. Fig.3 은 단일 분무에 대한



(a) Tip penetration



(b) SMD

Fig. 3 Calculation for the single spray

계산결과를 실험값<sup>(10)</sup>과 비교한 그림이다. Fig.3 (a)은 분무침투거리를 나타내고 있는데 공동현상 모델을 사용한 Wave 미립화 모델<sup>(5)</sup>의 경우 실험값과 가장 좋은 일치율을 보이고 있다. Sarre 등<sup>(6)</sup>의 공동현상 모델은 노즐의 유효단면적과 초기 분무속도를 노즐내부의 조건 및 유체의 물성치를 기초로 계산하는데 공동현상 모델을 사용하지 않은 경우에 비해 높은 분무침투거리를 보이며 실험값에 근접한 결과를 나타내고 있다. Fig.3(b)는 노즐의 20mm 하류에서 시간에 따른 SMD 분포를 보여주고 있다. Reitz와 Diwakar 모델<sup>(11)</sup>은 실험의 경향을 나타내지 못하고 있는 것을 알 수 있으며 Wave 모델을 사용한 경우에는 전반적으로 실험값과 좋은 일치율을 보여주고 있다. 이상의 예비해석을 바탕으로 이후의 분무간 충돌현상의 계산에서는 미립화 과정에 대해서는 Wave 모델을 사용하였으며 노즐내부의 공동현상을 고려하기 위해서 Sarre 등의 모델을 사용하였다.

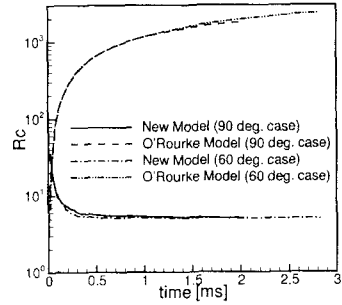


Fig. 5 The ratio of the cumulative collision occurring number to total injected total parcels number

## 4.2 분무간 충돌현상에 대한 수치해석

### 4.2.1 충돌분무의 거동

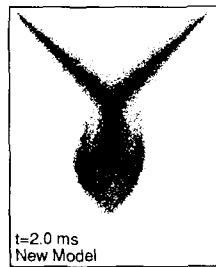
각각의 노즐에서 분사된 액체제트는 미립화 현상을 겪으면서 분무를 형성하며 진행하다가 서로 충돌하여 분무액적들간에 상호작용을 거치면서 궤도를 수정하여 아래쪽으로 진행하게 된다. Fig.4는 충돌각이 90 도인 경우에서 본 연구에서 제안된 새로운 충돌 모델을 사용한 결과를 O'Rourke의 모델을 사용한 결과 및 실험을 통해 얻은 분무형상과 비교하고 있다. 그림에서 알 수 있듯이 새로운 모델을 사용한 계산이 기존의 O'Rourke 모델을 사용한 경우에 비해 충돌이후 액적의 분포가 더 넓은 것을 알 수 있으며 실험결과와 잘 일치하고 있다. 이러한 경향을 나타내는 원인으로 충돌발생횟수의 차이를 들 수 있다. Fig.5는 시간에 따른  $R_c$ 의 변화를 보여주는데 여기서  $R_c$ 는 다음과 같이 정의 된다.

$$R_c = \frac{\text{the cumulative collision number}}{\text{the total number of introduced parcels}}$$

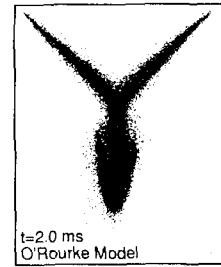
그림에서 보면 새로운 모델의 경우  $R_c$  값이 O'Rourke 모델에 비해 크게 낮은 것을 볼 수 있는데 이것은 충돌 발생조건에 액적들의 진행 방향을 고려함으로써 충돌발생 확률이 감소했기



(a) Experiment [ref. (2)]



(b) New Model



(c) O'Rourke Model

Fig.4 Comparison of the predicted spray shape with the experiment for 90 degree case

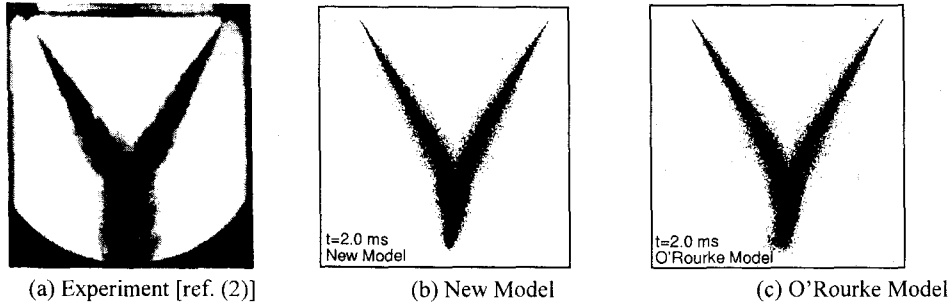


Fig.6 Comparison of the predicted spray shape with the experiment for 60 degree case

때문으로 생각된다. 그리고 충돌 발생의 감소로 인해 각각의 분무들의 진행방향으로의 운동량 감소가 상대적으로 줄어들게 되고 이로 인해 Fig.5와 같은 더 넓은 액적 분포를 나타내게 된 것으로 생각된다.

Fig.6은 충돌각이 60도 경우에 대한 결과를 보여주고 있는데 충돌각이 90도인 경우와는 달리 충돌한 분무들이 부드럽게 휘어지면서 진행하고 있으며 충돌이후의 분무체적도 상대적으로 작은 것을 볼 수 있다. 또한 충돌 모델들의 영향도 크게 나타나지 않고 있다. 이것은 충돌각이 완만해짐에 따라 충돌로 인한 분무간의 상호작용이 감소했기 때문으로 생각할 수 있으며 이를 통해 충돌 분무의 거동에 있어서 충돌각이 중요한 역할을 하고 있음을 알 수 있다.

#### 4.2.2 충돌분무의 분무침투거리와 SMD

Fig.7과 8은 분무침투거리에 대한 계산결과를 실험값과 비교한 것이다. Fig.7은 충돌각이 90도인 경우에 대한 것으로 새로운 모델의 경우 실험값과

잘 일치하는 것을 볼 수 있다. 그럼에도 불구하고 O'Rourke의 모델을 사용한 경우와의 차이는 충돌 분무 형상에 대한 차이에 비해 크다고 할 수 없는데 이것은 분무침투거리가 충돌발생횟수에 관계없이 일단 초기에 충돌한 분무액적에 의해 결정되기 때문으로 생각된다. Fig.8을 보면 충돌각이 60도인 경우에서도 분무침투거리의 예측에 있어서 충돌 모델에 따른 영향은 그리 크지 않은 것을 볼 수 있다. 한편 충돌각에 따른 경향을 살펴보면 90도인 경우에 분무침투거리가 60도의 경우에 비해 약간 작은 것을 볼 수 있다. 충돌각이 큰 경우에서 분무간 충돌에 의한 상호작용이 상대적으로 더 강하여 운동량 손실이 보다 커지기 때문으로 생각된다.

Fig.9와 10은 z축 방향으로의 각 지점에서 시간에 따른 SMD 변화를 나타낸 것인데 문헌에서 실험값이 주어지지 않았기 때문에 계산 결과만 나타내었다. Fig.9는 충돌각이 90도인 경우에 대한 것인데 (a)는 분무간 충돌이 발생하기 전, 그리고

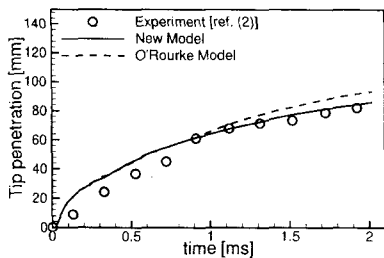


Fig. 7 Tip penetration for 90 degree case

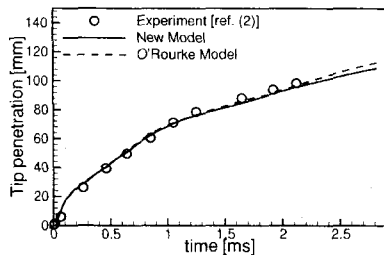
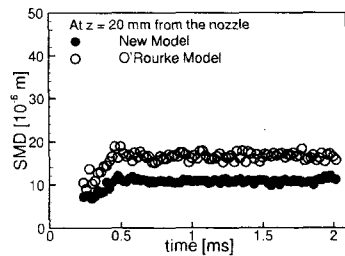
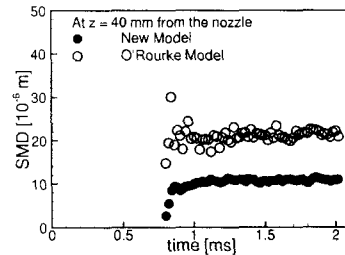


Fig. 8 Tip penetration for 60 degree case

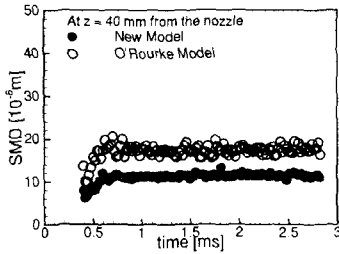


(a) Before the inter-spray impingement

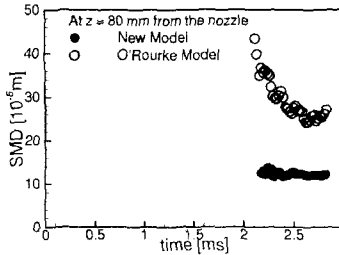


(b) After the inter-spray impingement

Fig. 9 Predicted SMD for 90 degree case



(a) Before the inter-spray impingement



(b) After the inter-spray impingement

Fig. 10 Predicted SMD for 60 degree case

(b)는 충돌 발생 후의 SMD 분포를 각각 나타내고 있다. 분사 초기에 큰 차이를 보이지 않던 액적의 SMD는 분무가 진행됨에 따라 분무간 충돌이 발생하기 전부터 충돌모델에 따른 차이가 나타나고 있으며 이 차이는 분무간 충돌이후에 더욱 커지고 있다. 이러한 경향은 충돌각 60도의 경우를 보여주는 Fig.10에서도 나타나고 있다. 새로운 모델을 사용한 경우가 전체적으로 큰 SMD를 나타내고 있는데, 이것은 앞에서 살펴본 것처럼 O'Rourke 모델을 사용한 경우에 충돌발생횟수가 크게 증가하기 때문이라고 볼 수 있다. 충돌발생횟수가 증가하면 이에 따라 액적간의 융합현상이 그만큼 활발해지기 때문에 액적의 크기가 증가하는 것이다. 그러나 액적 크기에 대한 실험자료가 없기 때문에 모델 성능에 대한 정확한 평가는 불가능하며 앞으로 이러한 분무간 충돌모델에 대한 연구가 계속되어야 할 것으로 생각된다.

## 5. 결론

본 연구에서는 분무간 충돌시스템에 대한 수치 해석을 수행하였으며 이 과정에서 액적의 진행방향에 따른 충돌 발생 조건이 포함된 새로운 충돌 모델을 제시하여 기존의 O'Rourke의 모델 및 실험값과 비교하였다. 이를 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 충돌각이 클수록 분무간의 상호작용이 증가하여 분무체적이 증가하고 분무침투거리가

짧아지는 경향을 보였다.

2. 새로운 충돌 모델을 사용한 경우 기존의 모델을 사용한 경우에 비해 충돌발생횟수가 크게 감소하였으며 이것은 충돌이후의 분무 형태에 영향 주었다.
3. 새로운 충돌 모델은 기존의 모델에 비해 분무의 형상이나 분무침투거리의 예측에 있어서 실험값과 좋은 일치를 보여주었다.
4. 새로운 충돌 모델의 경우 기존의 모델에 비해 액적의 SMD를 작게 예측하는 경향을 보였으며 이것은 충돌발생횟수가 상대적으로 작기 때문으로 생각된다.

본 연구에서 제시된 새로운 충돌 모델에 대한 검증은 위한 연구가 계속되어야 하며 이에 앞서 분무간 충돌시스템에 대한 보다 많은 연구가 선행되어야 할 것으로 생각된다.

## 참고문헌

- (1) M. Arai and M. Saito, 1999, Atomization Characteristics of Jet-to-Jet and Spray-to-Spray Impingement Systems, *Atomization and Sprays*, Vol. 9, pp. 399-417, 1999.
- (2) T. Chiba, M. Saito, K. Amagai and M. Arai, 2000, Inter-Spray Impingement of Two Diesel Sprays, ICLASS2000, CA, USA, July, 2000.
- (3) P.J. O'Rourke, 1981, *Collective Drop Effects on Vaporizing Liquid Sprays*, PhD Thesis, Mechanical and Aerospace Engineering, Princeton University, USA.
- (4) N. Nordin, *Complex Chemistry Modeling of Diesel Spray Combustion*, MS thesis, Chalmers University of Technology, Sweden, 2000.
- (5) R.D. Reitz, *Modelling Atomization Process in High Pressure Vaporizing Sprays*, *Atomization and Spray Technology*, pp. 309-337, 1987.
- (6) C.K. Sarre, S.-C. Kong and R.D. Reitz, *Modeling the Effects of Injector Nozzle Geometry on Diesel Sprays*, SAE1999-01-0912, 1999.
- (7) W.C. Reynolds, *Modeling of Fluid Motions in Engines and Introductory Overview*, in *Combustion Modeling in Reciprocating Engines*, Ed. J.N. Mattavi and C.A. Amann Plenum Press, NY, 1980.
- (8) A.D. Gosman and E. Ioannides, *Aspects of Computer Simulation of Liquid-Fuelled Combustors*, AIAA Paper 81-0323, 1981.
- (9) Gavaises, *Modeling of Diesel Fuel Injection Processes*, PhD Thesis, Imperial College of Science and Technology and Medicine, Department of Mechanical Engineering, Univ. of London, 1997.
- (10) L. Allocca, P. Belardini, C. Bertoli, F.E. Corcione, and F. De Angelis, *Experimental and numerical analysis of a diesel spray*, SAE Paper 920576, 1992.
- (11) R.D. Reitz and R. Diwakar, *Effect of Drop Breakup on Fuel Sprays*, SAE Paper 860469, 1986.