

디젤분무의 벽면충돌모델

Models of Diesel Spray impinging on walls

박 권 하*

K. Park

1. 서론

연소실벽면 근처에서의 디젤분무거동은 디젤 기관의 설계 및 성능에 중요한 역할을 한다⁽¹⁾. 특히 디젤기관이 소형·고속화됨에 따라 분사 압력이 높게되고 연소실은 작아짐으로서 분사된 디젤연료가 연소실벽면에 쉽게 충돌하게 된다. Warlberger와 Catellieri⁽²⁾의 관찰에 의하면 고부하에서 분사연료의 50% 이상이 피스톤보울에 충돌된다. 벽면에 충돌된 분무거동은 연소와 배기특성에 중요한 역할을 하게되는데, 연소실의 조건에 따라 벽면근처의 거동이 달라진다. 연소실에 충돌하는 액적은 주위공기유동에 의하여 휘어지면서 벽면에 충돌하게된다. 충돌된액적은 더욱 작은 액적들로 분쇄되면서 튀어나가거나 충돌면에 유막을 형성하면서 남게된다. 전자의 경우는 유동의 활성화와 함께 분무 연료를 더욱 넓게 분포시켜서 연료증발과 혼합 특성을 향상시키는 역할을 하는 반면, 후자의 경우에는 연료의 벽면퇴적에 의하여 매연, 미연탄화수소 및 연료소모율을 증가시키게 된다^(3,4,5). 따라서 효율적인 디젤기관의 설계를 위해서는 디젤분무의 벽면거동을 정확하게 파악하는 것이 중요하며 많은 연구들이 실험과 계산에 의하여 수행되고 있다.

본 고에서는 단일 액적 및 분무의 벽면충돌에 관한 여러 실험들을 분석하며 충돌분무의 수학적 모델에 관하여 종합적으로 고찰하고자 한다.

2. 충돌분무의 물리적 거동특성

충돌분무의 거동특성을 규명하기 위하여 많은 연구들이 수행되었지만 이를 적절히 해석하여 수학적으로 모델링하는 데에는 어려움이 많다. 디젤분무의 벽면충돌은 많은 액적들이 다발적으로 동시에 혹은 연속적으로 충돌되기 때문에 이를 총괄적으로 해석하는 것은 매우 어렵다. 따라서 정밀한 수학적모델과 충돌현상의 기본적인 이해를 도모하기 위하여 단일 액적의 벽면거동을 분석하는 연구가 진행되었다.

Jayarathne과 Mason⁽⁶⁾은 60-200 μm 의 물액적을 경사면에 충돌시켜 액적의 충돌전후 거동을 분석함으로써 충돌각도에 따른 운동에너지의 손실을 그래프로 나타내고 실험식을 제시하였다. 그후 Wachters와 Westerling⁽⁷⁾은 고온(400°C)의 금표면에 여러 가지 종류의 액적들을 충돌시켜 관찰하였다. 충돌면과 수평방향으로는 충돌전후의 속도변화가 없음을, 수직방향으로는 Weber수에 따른 운동에너지 변화율을 그래프로 나타내었다. 또한 액적의 미립화에 대해서는 웨버수의 크기에 따라서 변화된다. 고속충돌에 속하는 높은 웨버수 ($We > 80$)에서는 작은 액적들로 부서지면서 충돌면에 유막을 형성하고, 중간 웨버수 ($30 > We > 80$)에서는 충돌액적이 튀어오르면서 한두개의 작은 액적으로 분리된다. 매우 작은 속도구간인 $We < 30$ 인 경우에는 액적의 분열현상은 없다. 유사한 연구가 Araki와 Moriyama⁽⁸⁾에 의하여 수행되었다. 400°C의 크롬도금 구리판을 사

* 정회원, 한국액체미립화학회

용하였으며 사용된 액체의 종류에 따라 또한 충돌면의 온도에 따라 안정영역의 웨버수가 변화됨을 보여준다. Fig. 1과 Fig. 2는 웨버수가 작은 안정영역과 높은 불안정 영역에서의 액적 충돌 현상을 보여 준다. 안정영역에서는 충돌된 액적이 충돌면을 따라 펼쳐진 후에 다시 줄어들면서 튀어오르는 것을 볼 수 있다. 불안정 즉 고속충돌의 경우에는 충돌된 액적이 매우 작은 액적들로 분열되면서 충돌면에 퍼져 유막을 형성하거나 부분적으로 뭉쳐서 튀어오르는 것을 보여 준다.

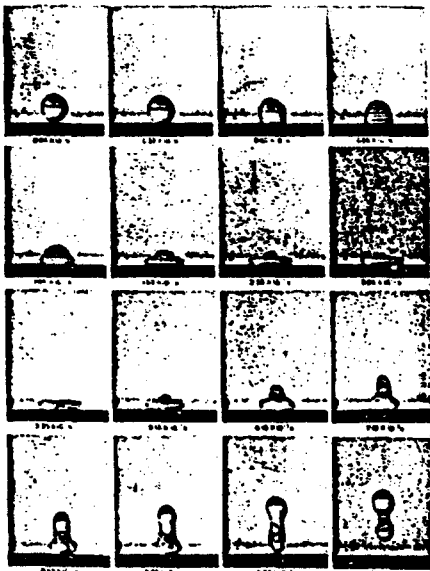


Fig. 1 Impacting drop behavior at $We=15$

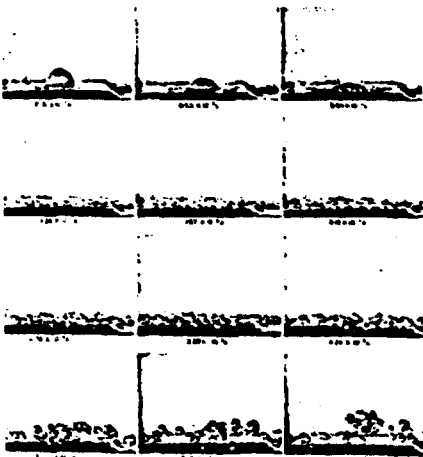


Fig. 2 Impacting drop behavior at $We=184$

Moureau 등⁽⁹⁾은 훨씬 광범위한 조건인 웨버수가 200에서 1800까지 충돌면의 온도가 600에서 1100℃인 경우에 대하여 실험하였으며 Wachters와 Westerling⁽⁷⁾에 의하여 주어졌던 액적의 분열한계($We=80$)를 확인하였다.

Al-Roub 등⁽¹⁰⁾은 벽면온도를 유막형성온도(100℃), 천이구간(200℃)과 비등온도(350℃)로 구분하고 웨버수를 100에서 300까지인 경우에 대하여 한두개의 액적을 연속적으로 충돌시켜 이들의 거동을 가시화하여 분석하였다. Fig. 3은 천이구간에서 2개의 액적이 순차적으로 충돌할 때의 액적분열현상을 보여준다. 그들⁽¹¹⁾은 계속되는 연구에서 보다 많은 조건에서의 결과를 발표하였으며 이를 6개의 다른 충돌현상으로 구분하였다(Fig. 4, 5). 6구간은 충돌후 분쇄 없이 하나의 액적으로 튀어오르는 경우, 두 개로 미립화되는 경우, 천이비등영역에서 저속으로 충돌하는 경우, 고속으로 충돌하는 경우, 비등영역에서 저속으로 충돌하는 경우와 고속으로 충돌하는 경우이다.

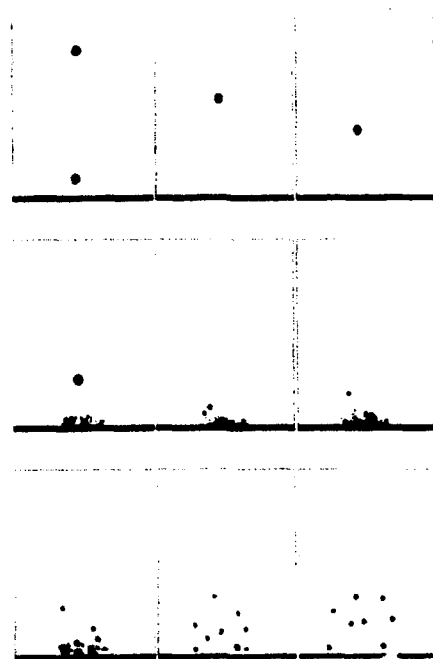


Fig. 3 Time history of pair of droplets impinging at $T=200^\circ\text{C}$ and $We=200$

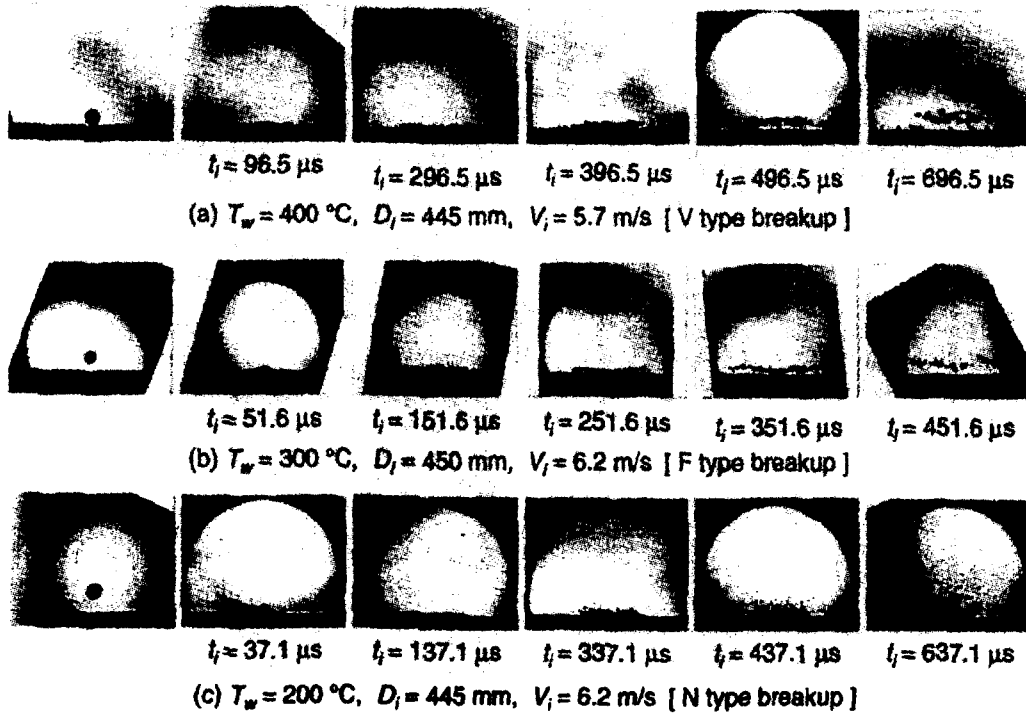


Fig. 4 Break-up behavior of impinging droplet

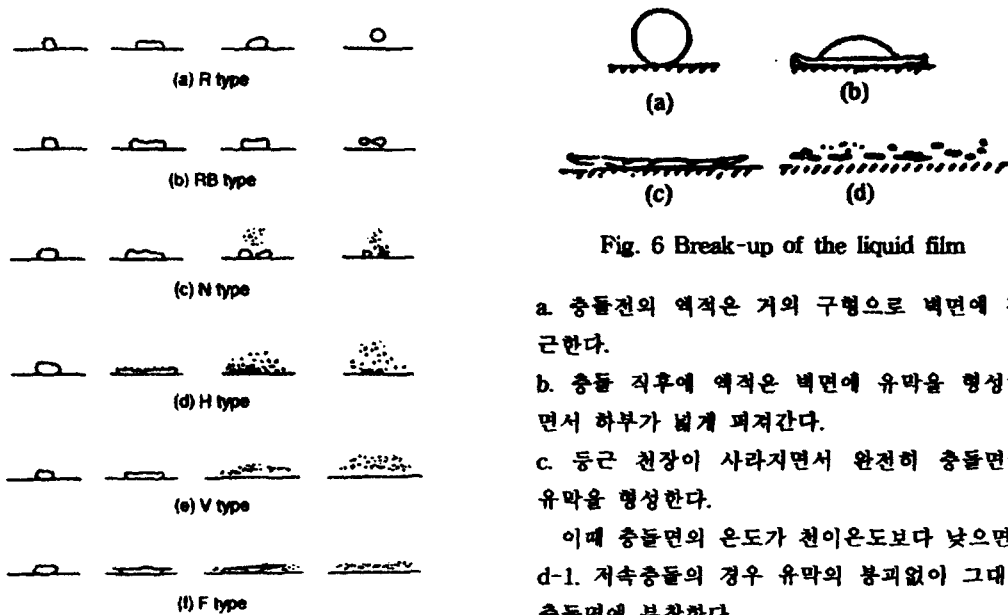


Fig. 5 Model of breakup forms

이상의 실험결과들을 종합적으로 살펴보면 다음과 같다(Fig. 6).

Fig. 6 Break-up of the liquid film

- a. 충돌전의 역적은 거의 구형으로 벽면에 접근한다.
- b. 충돌 직후에 역적은 벽면에 유막을 형성하면서 하부가 넓게 퍼져간다.
- c. 등근 천장이 사라지면서 완전히 충돌면에 유막을 형성한다.
- 이때 충돌면의 온도가 천이온도보다 낮으면,
 - d-1. 저속충돌의 경우 유막의 붕괴없이 그대로 충돌면에 부착한다.
 - d-2. 고속충돌의 경우 유막은 유지되면서 부분적으로 분열되어 튀어나간다.
- 충돌면의 온도가 천이구간이면,
 - d-3. 저속 충돌의 경우 부분적으로 유막을 유

지하면서 부분적으로 유막의 붕괴와 함께 작은 액적들이 튀어나간다.

d-4. 고속으로 충돌하는 경우에는 전체적으로 유막이 붕괴되면서 작은 액적들이 튀어나간다.

충돌면의 온도가 천이온도보다 높으면,

d-5. 저속충돌의 경우 유막이 오그라들어 미립화 없이 튀어오른다.

d-6. 고속으로 충돌하는 경우에는 매우 작은 액적으로 미립화되면서 충돌면위에 분포한다.

즉 충돌면의 온도가 낮은 경우에는 항상 충돌부위에 유막을 형성하게 되며 고속으로 충돌하는 경우에는 물위에 물방울을 떨어뜨리는 때와 같이 왕관현상과 유사하게 작은 액적들이 튀어오르게 된다. 한편 충돌면의 온도가 높은 경우에는 충돌과 함께 형성되었던 유막이 저속충돌의 경우 신속하게 오그라들면서 하나의 액적으로 튀어오르며 고속충돌의 경우에는 유막의 비등과 함께 매우 작은 액적들로 미립화되어 벽면부근에 분포하게 된다.

3. 충돌분무의 수학적 모델

3.1 현상학적인 모델

분무를 물이나 공기와 같은 연속유체로 가정하고 해석하는 것이다. Singal과 Pundir⁽¹²⁾는 인테그럴 모델링방정식에 기본을 둔 벽면제트모델(Fig. 7)을 제시했으며 충돌분무진행거리, 속도와 공기유입량을 실험치와 비교하였다. Sindano와 Dent⁽¹³⁾는 역시 그들의 모델을 적용하여 충돌분무의 진행거리, 표면적, 유막의 두께 등을 비교분석하였다.

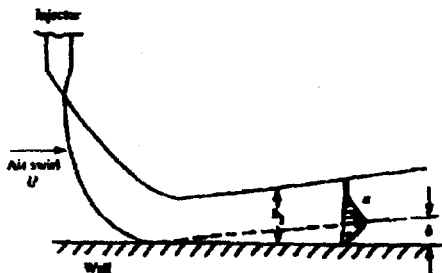


Fig. 7 Schematic of wall jet growth

이러한 모델은 액적들이 분사되어 미립화되고 벽면에 충돌하여 이차 미립화되는 디젤기관의 부무를 해석하는 데에는 한계가 있음으로 해서 더 이상 개발되지 못하였다.

3.2 제트 모델

초기의 KIVA-II 코드에는 액적의 충돌거동을 고려하지 않았으며, 단순히 벽면에 충돌된 액적은 충돌면에 부착하여 증발된다고 가정하였는데, 이를 "Stick" 모델이라 한다. 충돌액적의 거동을 엔진계산에 적용하기 위하여 Naber와 Reitz⁽¹⁴⁾는 Stick 모델을 변형한 2개의 새로운 모델을 도입하였다. Reflect 모델은 벽면에 접근한 액적이 동일한 속도를 가지고 충돌면위로 튀어오른다는 가정이며, Jet 모델은 충돌된 액적이 동일속도를 가지고 충돌면과 평행하게 튀어나간다는 가정이다. 이때 튀어나가는 액적의 방향은 그들의 실험식을 사용하고 있다. 그들은 이 모델들을 엔진계산에 적용하였다. Stick 모델의 경우 분무가 충돌면 근처에 묻혀있음을 보여주며, Reflect 모델은 벽면근처에 액적이 남아있지 않았으며 Jet 모델의 경우 적절히 분포되어 실험결과와 유사함을 보여 주었다.

Naber 등⁽¹⁵⁾은 Jet 모델을 매우 가까운 충돌면에 고속으로 분사되는 경우에 적용한 결과 실험치를 적절히 예측하는 데에 실패하였다. 충돌된 액적들이 확산되지 않고 충돌면과 수평으로 과도한 진행을 하였다(Fig. 8).

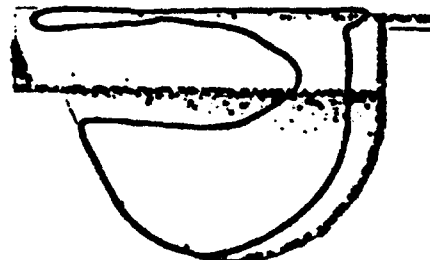


Fig. 8 Spray distribution by Jet model

따라서 그들은 충돌후의 수직방향속도를 충돌전 수직방향속도의 0-34% 사이에서 무작위로 선택하였으며 동시에 운동에너지보존을 고려하여 수평방향의 속도를 감소시켰다. 전체적으로

적절한 예측을 하였지만, 충돌이 시작된 직후에 매우 과도한 예측을 하였다. Allocca 등⁽¹⁶⁾은 이 수정 Jet모형을 정적용기의 벽면에 수직충돌하는 경우에 적용하였으며 실험결과를 적절하게 예측하지 못하였다.

Shih와 Assanis⁽¹⁷⁾는 고속으로 충돌하는 액적은 충돌면에 유막을 형성하고 임계속도이하의 충돌액적은 튀어나간다는 가정을 하였으며, 충돌후 수직방향속도를 충돌전속도의 0-100% 사이로 하였으며 역시 운동에너지의 손실은 없는 것으로 가정하였다. Reitz와 Rutland⁽¹⁸⁾는 임의로 주어지던 수직방향 속도를 Wachters와 Westering⁽⁷⁾의 실험결과를 이용하여 계산하였다.

이상의 Jet모형과 수정모형들은 저속의 충돌 현상에 대해서는 어느 정도 적절한 예측을 하지만 속도가 증가되면 대부분 과도한 계산결과를 보여 주는데 이는 다음과 같은 문제에 기인한다.

- a. Stick, Reflect, Jet모형 적용의 경계가 불명확하다.
- b. 충돌액적의 미립화가 고려되지 않았다.
- c. 운동에너지와 모델링 손실을 고려하지 않았다.

3.3 유막과 액적분열을 고려한 모델

Watkins 등에 의한 모델과 Gosman 등에 의한 모델 및 Fujimoto 등에 의한 모델을 대표적으로 들 수 있는데 이는 다음에 소개하며 이장에서는 그 외의 모델들에 대하여 고찰한다.

Tabata 등⁽¹⁹⁾은 유막미끄럼을 고려한 새로운 모델을 제시하였다. 구의 형태로 충돌한 액적은 충돌직후 원판형으로 변형되면서 충돌면상을 미끄러진후에 작은 액적들로 분열되어 튀어나간다. 수직방향의 속도성분은 Wachters와 Westering⁽⁷⁾의 실험식으로 계산되며 전체 속도는 운동에너지보존을 고려하여 계산된다(Fig. 9). 액적의 분열은 저속과 고속영역으로 나누어 모델링하였다. 저속에서는 하나의 액적으로 튀어 올라가며 고속영역에서는 Kobayashi 등⁽²⁰⁾의 실험에서 주어진 크기로 분열된다(Fig. 10).

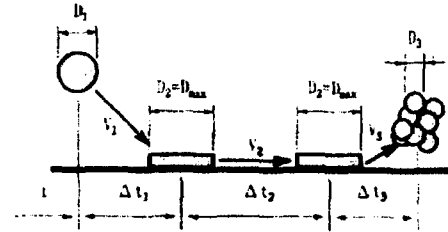


Fig. 9 Schematic of drop/wall impingement model

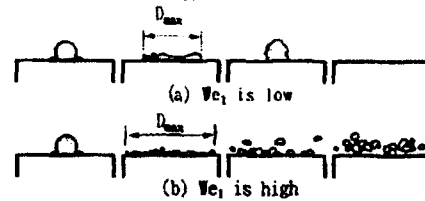


Fig. 10 Schematic of droplet deformation

Gavaises 등⁽²¹⁾은 충돌시의 액적의 분열을 TAB 모델을 이용하여 해석하였다. 충돌시의 액적변형율을 표면변형과 진동에너지가 초기의 표면변형과 진동 및 충돌에 의한 손실에너지와 같다는 가정에 의하여 계산하였다. 이 변형률이 주어진 한계치보다 크면 분열이 일어나는 것으로 간주하였다. 그들에 의하면 계산된 액적평균직경(SMD) 값이 실험 값과 잘 맞았다. 이후 Liu 등⁽²²⁾은 MDD모형을 적용하였다.

Stanton과 Rutland⁽²³⁾는 분무액적과 유막과의 충돌관계를 모델링하였다. 앞의 모델과 유사하지만 Fig. 11과 같은 4개의 영역으로 나누었으며 Fig. 12와 같이 모델링하였다.

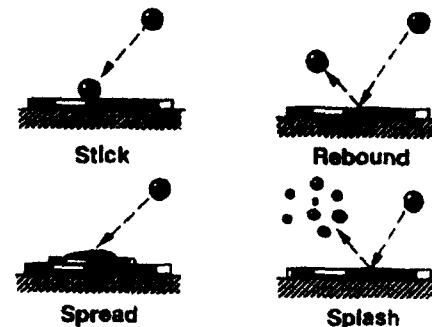


Fig. 11 Various impingement regimes identified in the spray-film interaction model

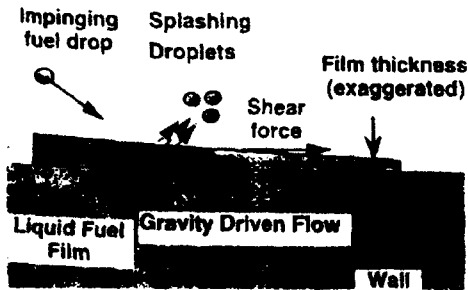


Fig. 12 Major physical phenomena governing film flow

3.4 Watkins 그룹의 모델

개별액적의 충돌거동에 대한 실험들^(6,7,8)에 기본을 두고 있다. Watkins와 Wang⁽²⁴⁾은 웨버수에 의하여 안정영역과 불안정영역으로 구분하고 충돌시의 에너지손실과 액적분열을 고려하여 모델링하였다. 저속충돌의 경우에는 수직방향의 에너지손실을 고려하여 작은 속도로 튀어오르며 고속의 경우에는 Stick모델과 같이 충돌면에 부착하여 증발하게된다. 이 모델은 수정Jet모델보다 매우 좋은 결과를 보여주고 있지만 충돌분무의 퍼짐에 있어서 부족하였다. 따라서 Wang과 Watkins⁽²⁵⁾는 O'Rourke와 Bracco⁽²⁶⁾의 액적간 충돌모델을 수정하여 액적간의 확산을 도모할 수 있도록하는 모델을 도입하였다. 이 모델은 충돌분무의 높이방향에서의 많은 향상을 보여주고 있지만 수평방향으로는 더욱 부족한 예측을 하였다. 이는 고속충돌의 경우에 액적이 벽면에 부착하여 움직이지 않는다는 가정이 잘못된 것으로 판단하여, Watkins와 Park^(27,28,29)은 고속충돌의 경우인 불안정영역에서 충돌에 의하여 미립화된 작은 액적들의 튀어나가는 속도를 액적의 변형속도에 근거하여 모델링하였다. 결과적으로 충돌면과 수직방향 및 수평방향에서 보다 향상된 결과를 얻을 수 있었다.

이 모델은 충돌전에 구형이던 액적이 충돌과 함께 Fig. 13과 같이 아래 부분이 변형되는때 이 때의 변형속도는 분열후 액적의 수평방향속도를 결정하게된다. 변형이 완료된 유막은 지속의 경우 다시 오그라들면서 튀어 오르며, 임계웨버수를 넘는 고속충돌의 경우에는 많은 작

은 액적들로 분열되어 튀어나간다. 이때 수직방향으로의 액적속도는 Wachters와 Westerling⁽⁷⁾의 실험치를 불안정 영역까지 확장한 Fig. 14에 의하여 주어지며, 수평방향으로의 속도는 안정속도와 분열속도의 합으로 주어지는데 안정속도는 충돌전의 수평방향속도이며 분열속도는 정지에서 액적변형의 최고속도사이의 값으로 주어진다. 액적의 분열은 유막의 두께를 고려하여 선형적으로 주어졌다.

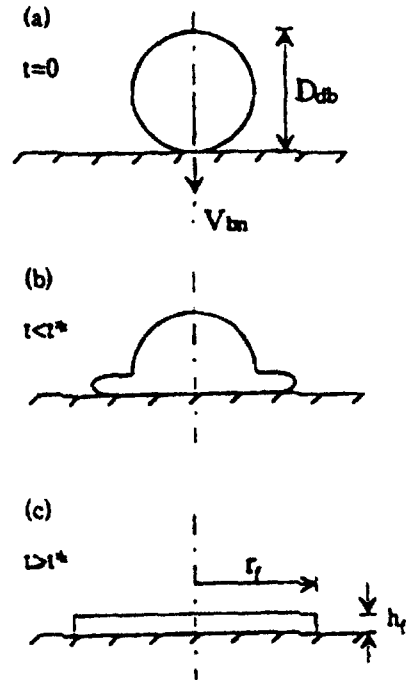


Fig. 13 Break-up of liquid film

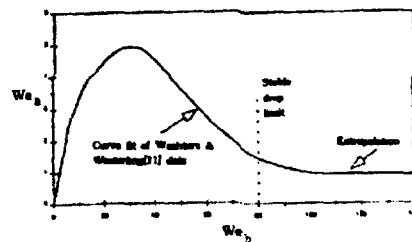


Fig. 14 Relationship between Weber numbers at arrival and at departure

3.5 Fujimoto 그룹의 모델

그들이 수행한 액적의 벽면충돌실험들⁽³⁰⁻³³⁾을 분석하여 모델링하였다.

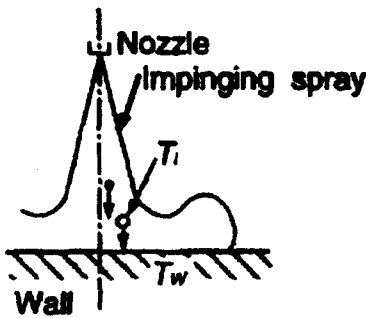
Senda 등⁽³⁴⁾은 충돌면의 온도를 액적의 포화 온도보다 낮은 경우와 높은 경우로 분리하여 다음과 같이 모델링하였다.

a. $T_w < T_{sat}$: 저온벽면모델

- i) 벽면 유막형성 모델
- ii) 유막형성후의 액적충돌에 의한 유막 붕괴 모델
- iii) 미립화액적들의 확산모델

b. $T_w > T_{sat}$: 고온벽면모델

- i) 충돌액적으로의 열전달 모델
- ii) 충돌면에서의 비동에 의한 미립화모델
- iii) 미립화액적들의 확산모델



T_w : Wall surface temperature

T_i : Temperature of impinging droplet

T_{sat} : Saturated temperature of fuel droplet

Fig. 15 Model on spray impingement

벽면온도가 포화온도보다 낮은 경우에는 처음 충돌하는 액적들이 충돌면에 유막을 형성한다. 즉 벽면에 충돌된 액적은 충돌한 곳에 그 양만큼의 작은 유막(radial film)을 형성하고 계속되는 충돌액적들이 연속적으로 충돌하여 넓은 면적에 유막풀(fuel pool)을 형성한다고 가정하였다. 충돌부위에 유막형성이 완료되면, 이후 액

적의 충돌은 액적튀김현상(Splash)을 갖으며, 이렇게 생성된 작은 액적들은 질량과 모멘텀이 보존되면서 확산된다. 충돌면이 포화온도보다 높을 때에는 충돌된 액적이 고온의 충돌면상에서 작은 액적들로 분열된다. 이 작은 액적들은 충돌면상에서 확산되고 벽면으로부터 액적으로 열이 전달되면서 증발된다.

Senda 등⁽³¹⁾은 이 모델을 좀더 자세하게 분류하였다. 미립화 없이 튀어오르는 경우(R type), 튀어오르면서 분열되는 경우(RB type), 천이비동영역에서 지속적으로 충돌하는 경우(N type), 고속으로 충돌하는 경우(H type), 비동영역에서 지속적으로 충돌하는 경우(V type)와 고속으로 충돌하는 경우(F type)이다. 이를 모델링하기 위하여 저속의 영역($We < 300$)과 고속의 영역($We > 300$)으로 구분하였으며 충돌후 액적이 튀어나가는 속도는 미립화를 고려한 에너지보존식인 다음 식을 사용하였다.

$$E_{out} = E_{in} - E_{cr}$$

여기서 E_{out} 는 튀어나가는 액적들의 에너지이며 E_{in} 은 충돌되는 액적의 에너지이고 E_{cr} 은 유막으로부터 액적이 분열되면서 요구되는 에너지이다. 분열된 액적의 크기는 그들의 실험⁽³⁵⁾에 근거를 두고 세 부분의 영역으로 구분하여 결정하였다. 그들의 결과를 보면 KIVA 코드에서 수행하였던 다른 모델들보다 일동함을 보여준다(Fig. 16)

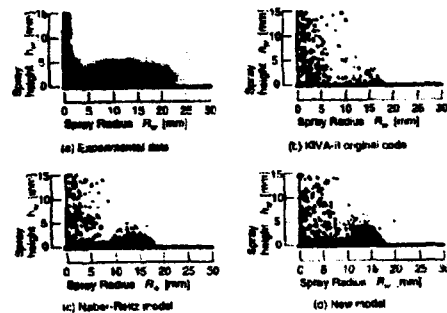


Fig. 16 Comparison of spatial distributions of the droplet parcels

3.6 Gosman 그룹의 모델

그들⁽³⁶⁾은 기존의 실험과 모델들을 분석하여 충돌현상을 표면온도와 충돌속도에 따라 10개의 구간으로 구분하였다. 우선 충돌현태를 Fig. 17과 같이 구분하고 이를 충돌조건에 따라 Fig. 18과 같이 구분하였다.

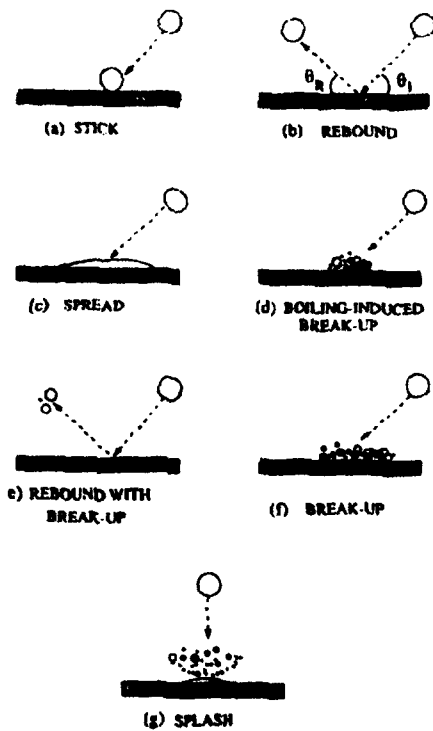


Fig. 17 Schematic of different impact regimes

충돌형태는,

- a. Stick: 구형의 충돌액적이 충돌면에 부착하는 영역으로 충돌에너지가 매우 작고 벽면온도가 기준온도(T_{PA}) 이하일 때
- b. Spread: 중간속도로 충돌하여 마른 표면에 퍼지면서 유막을 형성하거나 젖은 표면에서 기존의 유막과 합쳐지는 현상
- c. Rebound: 충돌후 액적이 튀어오르는 영역으로, 마른 표면의 경우 충돌액적이 높은 표면온도($T_w \geq T_{PR}$)의 영향으로 벽면에 접촉하지 못하고 증기에 의하여 분리된 상태에서 발생하며, 젖은 표면의 경우에는 낮은 속도로 충돌한

액적이 운동에너지를 거의 보존하면서 튀어오르는 현상

d. Rebound with breakup: 고온표면($T_w \leq T_{PR}$)에서 2-3개의 액적으로 분열되면서 튀어 오르는 현상

e. Boiling-induced breakup: 높은 표면온도($T_w \approx T_N$)에서 낮은 충돌속도의 액적까지 미립화되는 현상

f. Breakup: 매우 높은 표면온도($T_w > T_{PA}$) 영역에서 충돌액적이 유막을 형성한후 미립화되는 현상

g. Splash: 고속의 충돌에서 크라운을 형성하고 그 주위로 제트유동을 동반하면서 작은 액적들이 발생하는 현상

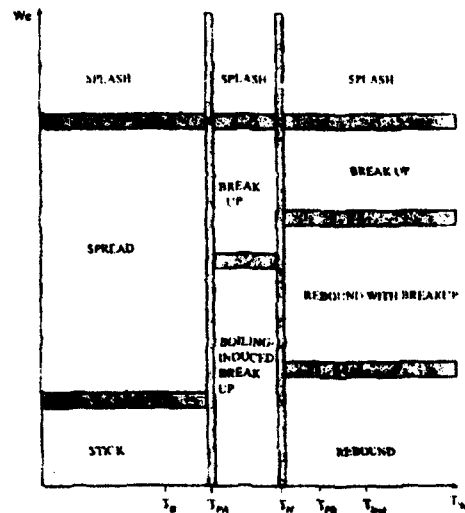


Fig. 18 Overview of droplet impingement regimes and transition conditions for a dry wall at fixed Laplace number and surface roughness

충돌에 영향을 미치는 조건으로

- a. 액적의 웨버수: 액적의 표면에너지에 대한 상대적인 운동에너지의 정도
- b. 액적 라플라스수: 액적의 점성력에 대한 상대적인 표면에너지의 정도
- c. 충돌각: 충돌각에 따라 액적의 미립화 정도가 변화됨⁽³⁷⁾

d. 벽면온도: T_B 는 비등온도, T_N 은 Nakayama온도(최대증발온도), T_{Leid} 는 Leidenfrost온도(최소증발온도), T_{PA} 는 순수 부착온도 그리고 T_{PR} 은 순수튀오름온도를 나타낸다.

e. 상대 유막 두께: 증돌액적과 비교되는 상대 유막 두께

f. 표면 거칠기: 증돌액적과 비교되는 상대 표면 거칠기

이러한 상세한 구분에도 불구하고 그들은 디젤 기관의 연소실 표면온도를 고려하여 비등점이 하의 영역에 대해서만 수학적으로 모델링하였다. 마른표면과 젖은 표면으로 구분하여 해석하였는데, 마른표면에 증돌하는 경우에는 Stick \rightarrow Spread \rightarrow Splash의 순으로, 젖은 표면에 대해서는 Rebound \rightarrow Spread \rightarrow Splash의 순으로 단순화하였다. 실험치와 비교된 그들의 결과는 상당히 잘 맞는 것으로 평가된다.

3. 결론

상기에서 살펴본 짧은 모델들은 디젤기관 연소실의 분무거동과 연소해석을 위하여 사용되고 있다. 특히 연료의 증돌을 피할 수 없는 고속소형디젤기관이나 M-형의 연소실과 같이 디젤연료를 벽면에 부착하여 연소를 제어하는 경우 및 분무의 증돌을 적극적으로 이용하는 증돌형연소실의 경우에는 매우 중요한 설계도구가 되고 있다. 분무의 벽면증돌현상은 증돌조건에 따라 연소에 미치는 영향이 크게 바뀌게 되는데 (1)액적분열과 주위공기유동의 활성화에 의하여 분무확산이 증대되면 연소특성의 향상을 가져오며 (2)유막을 형성하여 연료가 퇴적되면 연소특성의 저하를 초래하게 된다. 따라서 증돌모델은 엔진연소특성을 정확히 해석하는 데에 중요한 역할을 하며 복잡한 디젤분무 조건에 알맞는 정밀한 모델의 개발이 요구된다.

그러나 디젤분무의 증돌특성은 분사기의 특성, 연소실내의 유동, 벽면온도 및 거칠기 등의

조건에 따라 크게 변화되며 분무액적의 연속적이며 다발적인 증돌은 단일 액적의 거동만을 분석하여 수학적으로 체계화하는 데에는 한계가 있다. 하지만 디젤분무증돌현상이 더욱 중요한 설계인자로 되고 있기 때문에 상기에 기술된 여러 가지 모델과 좀더 기본적인 실험을 통하여 다양한 디젤연소실의 조건에 알맞은 모델이 개발될 수 있으면 한다.

참고 문헌

1. W. P. Cartellieri et al, "Status report on a preliminary survey of strategies to meet US-1991 HD diesel emission standards without exhaust gas after treatment", SAE Paper 870343, 1987.
2. P. Werlberger and W. P. Cartellieri, "Fuel injection and combustion phenomena in high speed di diesel engine observed by means do endoscopic high speed photography", SAE Paper 870097, 1987.
3. G. R. Lee and C. Morley, "Fuel-wall impaction as a mechanism for increased hydrocarbon emissions from fuel heavy ends", SAE Paper 952523, pp. 1918-1925, 1995.
4. Y. Matsui and K. Sugihara, "Sources of hydrocarbon emissions from a small direct injection diesel engines", JSAE Review, Vol.7, pp.4-11, 1986.
5. H. Tsunemoto and H. Ishitani, "The behavior of impinged fuel sprays on simulated combustion chamber walls in direct injection diesel engine", JSAE Review, Vol.3, 1982.
6. O. W. Jayaratne and B. T. Mason, "The coalescence and bouncing of water drop at air/water interface", Proc. R. Soc. Lond-A, 280, pp.545-656, 1964.

7. L. H. J. Wachters and N. A. J. Westerling, "The heat transfer from a hot wall to impinging water drops in the spheroidal state", *Chemical Engineering Science*, Vol.21, p.1059, 1966.
8. K. Araki and A. Moriyama, "Deformation behaviour of a liquid droplet impinging on a hot metal surface", *Int. Cont. on Liquid Atomization and Spraying Systems (ICLASS-82)*, 1982.
9. J. CL. Moureau, L. Bolle and M. Giot, "Influence of the droplet size distribution on the spray cooling efficiency", *Two-phase Momentum, Heat and Mass Transfer*, Vol.1, pp.171-184, 1979.
10. M. Al-Roub, P. V. Farrell and J. Senda, "Near wall interaction in spray impingement", *SAE Paper 960863*, 1996.
11. J. Senda, T. Kanda, M. Al-Roub, P. V. Farrell, T. Fukami and H. Fujimoto, "Modelling spray impingement considering fuel film formation on the wall", *SAE Paper 970047*, 1997.
12. S. K. Singal and B. P. Pundir, "Modelling spray/wall interaction in swirling flows for di diesel engines", *Proc. Inst Mech Engs*, Vol.204, pp.245-253, 1990.
13. H. Sindano and J. C. Dent, "Modelling of injected fuel film development and evaporation in a wall-wetting direct injection diesel engine", *Int. Conf. on Combustion in Engines-Technology and Applications*, IMechE, 1988.
14. J. D. Naber and R. D. Reitz, "Modelling engine spray/wall impingement", *SAE Paper 880107*, 1988.
15. J. D. Naber B. Enright and D. Ferrell, "Fuel impingement in a direct injection diesel engine", *SAE Paper 881316*, 1988.
16. L. Allocca, U. Amato, C. Bertoli and F. E. Corcione, "Comparison of models ad experiments for diesel fuel sprays", *Int. Symp. on Diagnostics and Modelling of Combustion in IC Engines*, pp.255-261, 1990.
17. L. K. Shih and D. N. Assanis, "Implementation of a fuel spray wall interaction model in KIVA-II", *SAE Paper 911787*, 1991.
18. R. D. Reitz and C. J. Rutland, "3-D modelling of diesel engine intake flow, combustion and emissions", *SAE Paper 911789*, 1991.
19. T. Tabata, Y. Ishii, T. Takatsuki and K. Yokota, "Numerical calculation of spray mixing process in a d.i. diesel engine and comparison with experiments", *SAE Paper 950853*, 1995.
20. M. Kobayashi, Y. Tanabe, J. Senda and H. Fujimoto, "Visualization and quantitative analysis of fuel vapor concentration in diesel spray", *11th Int. Combustion Engine Symp.*, pp.256-270, 1993.
21. M. Gavaises, A. Theodorakakos and G. Bergeles, "Modelling wall impaction of diesel spray", *Int. J. Heat and Fluid Flow*, Vol.17, pp.130-138, 1996.
22. Z. Liu and T. Obokata, "Modelling drop drag effects on fuel spray impingement in direct injection diesel engines", *SAE Paper 970879*, 1997.
23. D. W. Stanton and C. J. Rutland, "Modelling fuel film formation and wall interaction in diesel engines", *SAE Paper 960628*, 1996.
24. A. P. Watkins and D. M. Wang, "A new model for diesel spray impaction on walls and comparison with experiment", *Int. Symp. on Diagnostics and Modelling of Combustion in I.C. Engines*, 1990.
25. D. M. Wang and A. P. Wakens, "Numerical modelling of diesel spary wall impaction phenomena", *Int. J. Heat and Fluid Flow*, Vol.14-3, pp.301-312, 1993.

26. P. J. O'Rourke and F. V. Bracco, "Modelling of drop interactions in thick sprays and a comparison with experiment", Stratified Charge Automotive Engine Conf., IMechE, 1980.
27. A. P. Watkins and K. Park, "Assessment and application of a new spray wall impaction model", Computers in Reciprocating Engines and Gas Turbines, IMechE, pp. 1-10, 1996.
28. K. Park and A. P. Watkins, "Comparison of wall spray impaction models with experimental data on drop velocities and sizes", Int. J. Heat and Fluid Flow, Vol.17, pp.424-438, 1996.
29. K. Park and A. P. Watkins, "New approach for droplet wall impaction model", Computational Fluid Dynamics Journal, Vol.6, No.4, pp.477-492, 1998.
30. J. Senda, K. Takeuchi and Y. Sato, "Experimental studies on the behavior of a small droplet impinging upon a hot surface", ICLASS-82, No.14-4, pp.397-404, 1982.
31. J. Senda, K. Takeuchi and Y. Sato, "Atomization of spray droplet impinging upon a hot surface", Internal Combustion Engine, pp.9-18, 1982.
32. J. Senda, K. Yamada, K. Takeuchi and H. Miki, "Deformation and breakup behavior of a small droplet impinging upon a hot surface", Trans. of JSME pp.3372-3379, 1986.
33. J. Senda, K. Yamada, H. Fujimoto and H. Miki, "The heat transfer characteristics of a small droplet impinging upon a hot surface", JSME Int. journal, Series II, Vol.3, pp.105-111, 1988.
34. J. Senda, M. Kobayashi, S. Iwashita and H. Fujimoto, "Modelling of diesel spray impingement on a flat wall", SAE Paper 941894, pp.1-14, 1994.
35. M. A. Al-Roub, P. V. Farrell and J. Senda, "Near wall interaction in spray impingement", SAE Paper 960863, pp.171-181, 1996.
36. C. Bai and A. D. Gosman, "Development of methodology for spray impingement simulation", SAE Paper 950283, 1995.
37. S. C. Yao and K. Y. Cai, "Dynamics and heat transfer of drops impacting on a hot surface at small angles", Proc of the 3rd Int. Conf. on Liquid Atomization and Spray Systems, ICLASS-85, 1985.