

벽면충돌분무에 관한 수치해석

A Study of Numerical Analysis on Wall Impinging Spray

염 정 국*†
Jeong-Kuk Yeom*†

(접수일 : 2012년 09월 26일, 수정일 : 2013년 02월 06일, 채택확정 : 2013년 02월 19일)

Abstract: Phenomenon of droplet impingement with high temperature wall needs to be investigated because atomization process of droplet and cooling process of the wall by the impingement are very important in industry, thus studies concerned with temperature of piston wall have been conducted in spray characteristics analysis of diesel engine. Hence, in this study, we defined $DT_{sat}(= T_w - T_{sat})$ superheat degree of the wall by difference between T_w considering surface temperature of piston in the actual engine and T_{sat} saturation temperature of the fuel and then investigated spray behavior of wall impinging with variance of the boiling process. In this study, in order to analyze wall impingement of droplet in accordance with difference of boiling condition, calculational conditions were set as $DT_{sat}=40K$ (nucleate boiling), $DT_{sat}=140K$ (transition boiling), and $DT_{sat}=240K$ (film boiling). As a result, it can be found that fuel vapor increases and droplet mass decreases in the order of the nucleate boiling, transition boiling, and film boiling.

Key Words : Atomization, Degree of Superheat, Droplet, Engine, Saturation Temperature

— 기호 설명 —

p : 압력 [MPa]
S : 접촉면적 [m^2]
T : 온도 [K]
t : 시간 [ms]

하첨자

d : 액적
inj : 분사
sat : 포화

그리스 문자

a : 열전달률 [$W/m^2 \cdot K$]
t : 체류시간 [s]

1. 서 론

실제엔진에 이용되는 경유는 다수의 성분으로 구성된 다성분연료이기 때문에 연료분사 후 분무 내부의 각 성분의 공간분포가 예상된다. 즉 포화 온도가 낮은 성분은 분사개시 직후에 노즐근방에서 증발을 시작하고, 반면에 포화온도가 높은 성

*† 염정국(교신저자) : 동아대학교 기계공학과
E-mail : laser355@dau.ac.kr, Tel : 051-200-7640

*† Jeong-Kuk Yeom(corresponding author) : Department of Mechanical Engineering, Dong-A University.
E-mail : laser355@dau.ac.kr, Tel : 051-200-7640

분은 액상으로 벽면에 충돌하여 벽면 상에 액막을 형성한다. 또한 그 중간의 포화온도를 가지는 성분은 벽면근방에서 증기를 형성한다. 이와 같이 연료성분이 분무구조에 미치는 영향에 대한 규명이 필요하다. 또한 고온벽면에 액적이 충돌하는 현상은 벽면충돌에 의한 액적의 미립화와 액적의 충돌에 의한 벽면의 냉각이라고 하는 두 개의 관점에서 산업현장에서 중요시되어 많은 연구가 진행되고 있다. 그 연구결과에는 물과 경유를 시작으로 많은 성분의 열전달특성 중 하나로서 증발수명곡선을 들 수 있고, Fig. 1에 액적의 전형적인 벽면상에서의 증발수명곡선을 보인다. 증발수명곡선은 Fig. 1에 나타낸 것과 같이 (i) 비비등영역, (ii) 핵비등영역, (iii) 천이비등영역 및 (iv) 막비등영역 4가지 영역으로 나누어진다. 그리고 그림 중의

점 A는 비점, 점 B는 최대증발률점, 점 C는 Leidenfrost점이다. 이와 같은 특성을 나타내는 경우, 벽면온도 대신에 벽면온도 T_w 와 연료의 포화온도 T_{sat} 의 차로써 정의되는 벽면과열도 DT_{sat} ($=T_w - T_{sat}$)가 자주 이용된다. Senda 등¹⁾은 벽면과열도에 의해 정리한 경유와 물의 수명곡선을 비교하고, 경유와 물의 벽면과열도 범위가 동일하면, 그 벽면에서의 열전달 및 비등현상은 동일하다고 발표하였다. 따라서 이 연구에 있어서도 비등영역은 벽면과열도에 의해 정리하고, 연료의 차이에 관계없이 동일한 벽면과열도에 있어서는 동일한 거동을 나타낸다고 가정한다. 직분식 디젤기관내의 연소실 내에서의 피스톤 표면온도는 피스톤의 재질이나 부하 등에 의해 변화한다. 중유를 연료로 하는 중형의 주조 피스톤의 엔진에서 그표면온도

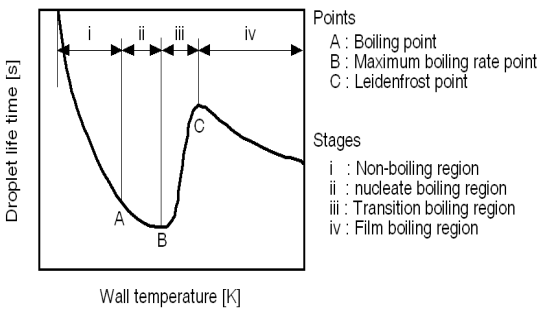


Fig. 1 Curve of the droplet life on the wall surface

Table 1 Computational conditions

Injection velocity	V_{inj} [m/s]	338
Injection duration	t_{inj} [ms]	1.54
Injection quantity	Q_{inj} [mg]	12.0
Initial droplet temperature	T_{pr} [K]	293
Fuel		n-Tridecane
Number of parcel	N_p	1000
Ambient temperature	T_a [K]	700
Ambient density	ρ_a [kg/m ³]	12.3
Wall temperature	T_w [K]	550, 650, 750
Impingement distance	Z_w [mm]	40
Impingement angle	α_w [deg.]	0
Maximum time step	Δt_{max} [s]	1.0×10^{-6}
Minimum time step	Δt_{min} [s]	0.5×10^{-8}
Number of mesh		$60 \times 1 \times 42$ (sector mesh)

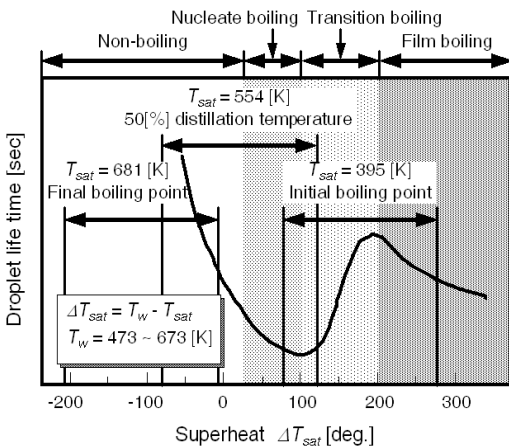


Fig. 2 Droplet life time of each composition in actual engine

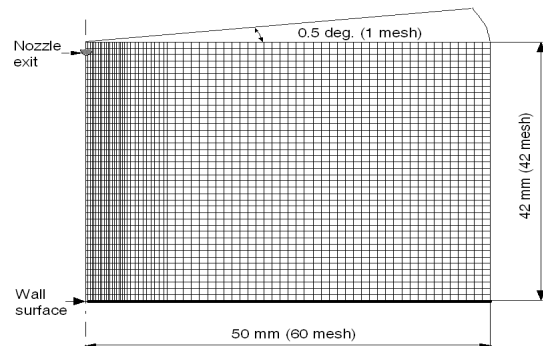


Fig. 3 Computational mesh in numerical simulation ($Z_w=40$ mm)

는 최고 673~723K이다.²⁾ 경유를 연료로 하는 소형 알루미늄 피스톤은 최고 벽면온도는 573~623K이다.²⁾ 또한 Murayama³⁾는 와류실을 가지는 부실식 디젤엔진의 벽면온도를 계측하고, 그 온도 범위는 473~723K이라고 보고하였다. 이러한 결과들로부터 이 연구에서 대상으로 하는 실엔진의 벽면온도 범위는 3~6MPa 가압조건 하에서 473~673K이다. 그리고 경유의 포화온도로서 초유점, 50% 유출온도, 종말점으로 구분하면 벽면과열도의 범위는 Fig. 2에 나타낸 것처럼 -208~278K로 상당히 넓게 된다. 즉, 종말점에 대해서는 $DT_{sat}=-208\sim-8K$ 로 비비등영역($DT_{sat}<25K$), 50% 유출온도에 대해서는 $DT_{sat}=-81\sim119K$ 로 비비등영역에서 핵비등영역($DT_{sat}=25\sim100K$), 초유점에 대해서는 $DT_{sat}=78\sim278K$ 로 주로 천이비등영역($DT_{sat}=100\sim200K$)에서 막비등영역 ($DT_{sat}=200\sim300K$)으로 모든 비등형태를 가진다. 이러한 기본 내용들에 기초해 이 연구에서는 벽면온도와 연료포화온도를 고려한 벽면과열도를 이용해 고체와 액체 계면에서 비등형태에 의한 벽면충돌분무 중의 액적 분열거동의 차이를 KIVA-II code로 해석하였으며, 그 결과는 실제엔진 혼합기 형성과정의 규명을 위한 자료로 활용 할 수 있다고 판단된다.

2. 수치해석 조건 및 방법

2.1 계산조건

Table 1에 이 수치해석의 계산조건을 나타낸다. Kusano⁴⁾의 엑시플렉스형광법을 이용한 증발장에 있어서 벽면충돌분무의 실험결과와의 비교를 통하여 새롭게 구축한 벽면고온 모델의 타당성을 확인하기 위해 실험과 동일한 분사조건 및 분위기조건으로 계산을 실시하였다. 그리고 비등상태의 차이에 의한 벽면 충돌거동을 해석하기 위하여 핵비등, 천이비등, 막비등의 각 영역에 해당하는 벽면과열도의 조건($DT_{sat}=40K, 140K, 240K$)에서 계산을 행하였다.

2.2 연료분사장치

연료로서 n-Tridecane($C_{12}H_{28}$)을 사용하여 분사조

건 및 분위기조건이 일정한 상태에서 계산을 실행하였다. 계산영역은 분무반경방향으로 50mm (60mesh), 축방향으로 42mm(42mesh), 원주방향 사잇각 0.5deg.(1mesh)의 섹터mesh이다. Fig. 3에 이 연구에서 사용한 계산 mesh를 보인다. 반경방향으로 분할은 분무축으로 가까이 갈수록 보다 조밀하게 하였다. 이 계산에서는 분열모델로서 수정 TAB모델^{5,6,7)} 및 액막형성 과정과 액적-액막간섭 과정을 고려한 벽면충돌모델^{8,9)}을 이용하였다.

3. 결과 및 고찰

Fig. 4에 분사압력 $p_{inj}=72MPa$, 충돌거리 $Z_w=40mm$, 벽면온도 $T_w=650K$ 인 경우 분사시작 후 $t=1.1ms$ 에 있어서의 연료증기, 액적 parcel의 공간분포, 엑시플렉스형광법에 의해 촬영한 같은 시간에서의 증

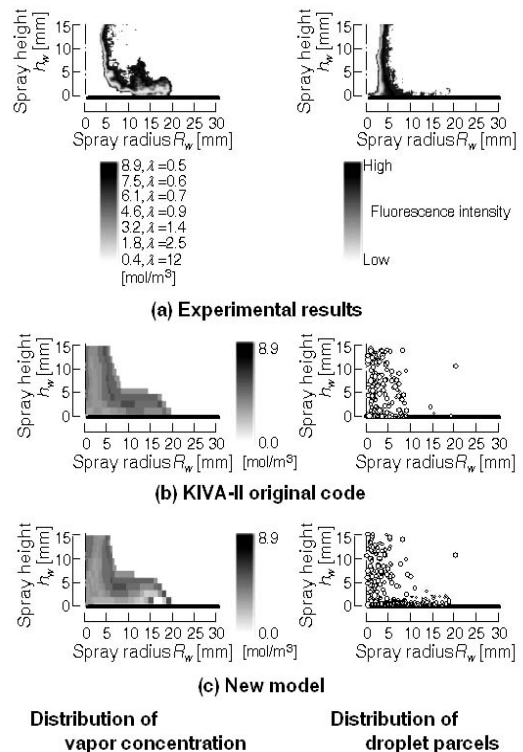
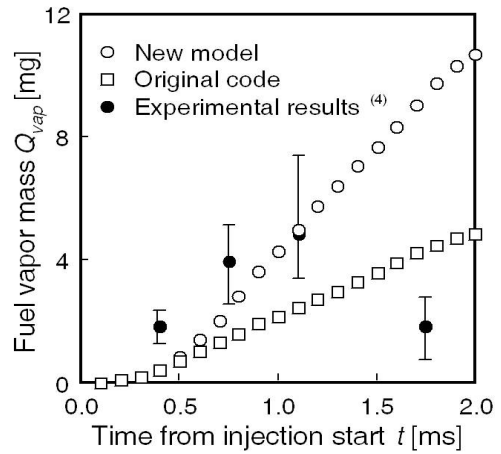


Fig. 4 Comparison of spatial distribution of fuel vapor concentration and droplet parcels ($T_w=650[K], t=1.1[ms]$)

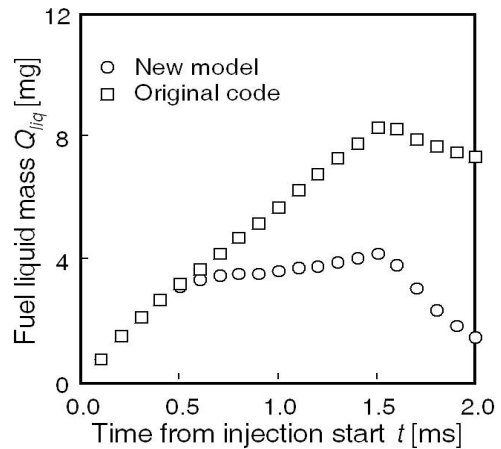
발분무 기상 및 액상의 이미지를 나타내고 있다. 그림 중의 (a)는 Kusano⁴⁾의 실험결과를, (b)는 KIVA-II original code에 의한 계산결과를, (c)는 이 연구에서 제시한 모델에 의한 계산결과를 각각 나타낸다. (b)의 original code에 있어서는 벽면에 충돌한 액적이 완전히 부착하기 때문에 액적 parcel의 분무반경방향으로 퍼짐은 작아지고, 분열을 동반하지 않기 때문에 비교적 큰 액적이 벽면 상에 존재하고 있다. 그리고 연료증기와 그 농도가 상당히 희박하고, 액적이 분무선단방향으로 확산하지 않기 때문에 분무선단근방의 농도가 실험결과와 비교해서 상당히 낮은 것을 알 수 있다. 한편 이 연구에서 제안한 모델(c)에 있어서는 액적 parcel의 분무반경방향으로 도달거리가 (a)의 실험결과와 양호한 일치를 보이고 있다. 또한 벽면 상에서 비등현상에 의한 액적의 분열이 발생하고, 벽면근방에서 비교적 작은 액적이 존재하고 있다. 한편 증기 농도분포에 있어서는 벽면으로부터의 열전달 및 비등현상에 의한 액적의 분열을 고려했기 때문에 벽면 상에 고농도의 증기가 형성되어져 있음을 알 수 있다. 이것은 실험결과와 정성적으로는 일치하지만, 분무 선단부의 증기농도가 실험값보다도 상당히 높고 실제의 현상을 완전하게 나타내고 있다고는 판단할 수 없다. 이것은 KIVA-II code에 있어서 증발한 연료증기가 주위기체로의 확산해석 관련부분에 개선할 필요가 있다고 판단된다.

Fig. 5에 기상 및 액상 연료량의 시간변화를 나타낸다. Fig. 5-(a)의 실험결과에 있어서 증기량이 분사종료 후 급속히 감소하는 것은 분무가시화 촬영에서 증기가 보이지 않을 정도로 확산했기 때문이라고 판단된다⁴⁾. 증기질량의 시간변화에 있어 이 연구의 모델은 original code와 비교해 실험결과와 비교적 잘 일치하고 있다. 그리고 벽면충돌이 시작하는 t=0.5ms 부근에 있어 벽면으로부터의 열전달 및 충돌에 의한 액적분열의 영향으로 증기량이 급격하게 증가함과 동시에 액적의 질량이 급격하게 감소하고 있는 것을 알 수 있다. 그러나 실험결과와 비교해 초기의 증기량이 과소평가되어져 있고, 진술한 것과 같이 KIVA-II code에

서는 연료 증기확산에 관한 계산의 개선이 필요함을 알 수 있다.



(a) Fuel vapor mass Q_{vap}



(b) Fuel liquid mass Q_{liq}

Fig. 5 Temporal change in fuel vapor mass and fuel liquid mass

($p_{inj}=72$ [MPa], $Z_w=40$ [mm], $T_w=650$ [K])

다음으로 비등상태가 벽면충돌거동에 미치는 영향에 대한 결과로서 Figs. 6~8에 충돌거리 $Z_w=40$ mm, 분사압력 $p_{inj}=72$ MPa, 분사 후 시간 $t_{inj}=1.54$ ms일 때의 수치해석 결과를 보인다. Fig. 6은 연료증기농도, Fig. 7은 액적 parcel, Fig. 8은 액적속도의 공간분포를 나타낸다. 각 그림에 있어서 (a)는 핵비등영역($T_w=550$ K, $DT_{sat}=40$ K), (b)는 천이

비등영역($T_w=650\text{K}$, $DT_{\text{sat}}=140\text{K}$), (c)는 막비등영역($T_w=750\text{K}$, $DT_{\text{sat}}=240\text{K}$)의 2차원단면의 결과이다. Fig. 6의 연료증기 농도분포는 각 비등상태에서 증기상이 벽면 반경방향으로 퍼지고, 분무선단부에 있어서 뒷방향으로 성장하고 있는 것을 알 수 있고, 그 분무선단부에는 연료증기농도가 높은 영역이 존재함을 알 수 있다. 이것은 실험해석⁴⁾에 있어서도 관찰되는 현상으로, 벽면 분무류의 선단부가 정지하고 있는 주위기체에 의해 저항을 받고, 연이어 계속 성장하는 운동량이 큰 증기군에 의해 위쪽방향으로 밀려올라가기 때문이라고 생각된다. 또한 각 비등현상에 의한 벽면근방의 분

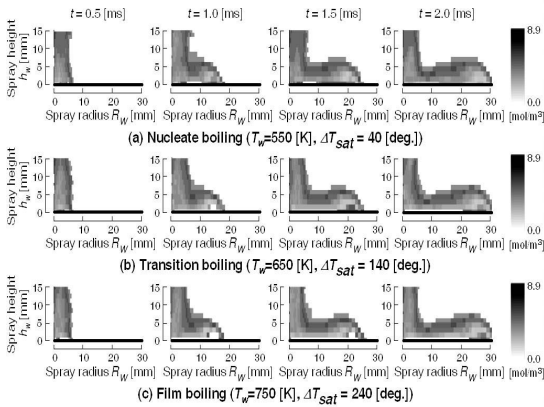


Fig. 6 Temporal change in spatial distribution of fuel vapor concentration

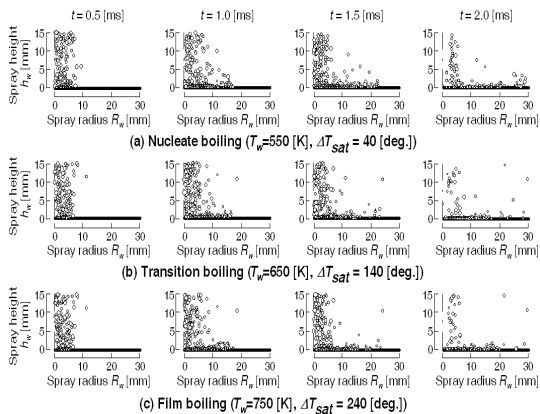


Fig. 7 Temporal change in spatial distribution of droplet parcels

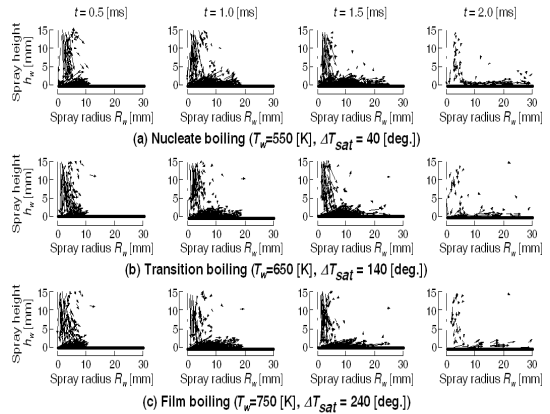


Fig. 8 Temporal change in spatial distribution of droplet velocity

무거동을 비교하면, 액막을 형성하는 (a)의 경우에 비해 벽면에 충돌한 액적이 분열·비산하는 (b), (c)에서는 벽면 상에 상당한 고농도의 증기가 형성되어 있고, 이 고농도증기의 존재영역은 벽면 과열도가 높은 막비등의 경우가 넓다. Figs. 1, 2에서 액적의 증발수명곡선으로부터 생각하면 막비등의 경우, 액적의 수명은 핵비등 및 천이비등의 수명보다도 길고, 막비등의 경우가 증발이 적게 일어나고 있다. 따라서 여기서 각각의 비등상태에서 발생하는 분무와 벽면의 간섭에 대해서 고찰하면, 핵비등에서는 액막이 형성되기 때문에 분무 충돌과 같이 액적이 연속해서 벽면으로 충돌하는 경우에는 후속의 액적이 앞 액적의 충돌에 의해 형성된 액막에 충돌하게 된다. 따라서 벽면과열도가 핵비등영역에 있는 경우 벽면상의 증기는 액막이 고온벽면으로 받는 열에 의해 증발해 형성된 증기가 지배적으로 되고, 모든 액적이 비교적 건조한 상태의 벽면에 충돌해 고온벽면으로부터 직접 열이 전달되는 천이영역과 막비등과 비교해 벽면상의 증기농도가 낮게 된다. 다음으로 천이비등과 막비등을 비교하면 그 영역에서의 열전달량은 식(1)과 (2)로 구할 수 있다. 여기서 액적과 벽면의 온도차를 나타내는 DT 는 벽면온도가 높은 막비등영역의 경우가 크지만 Fig. 9 및 식(3)에 나타난 것과 같이 열전달률 a_d 는 천이비등의 경우가 크게 된다. 이 연구의 계산조건으로 열전달률을

식(3)으로 구하면 막비등에서는($DT_{sat}=240K$)에서 α_d 는 $1731W/m^2K$, 천이비등($DT_{sat}=140K$)에서 α_d 는 $3454W/m^2K$ 로 되고 천이비등영역의 경우가 약 2 배정도 크다. 한편 액적과 벽면의 온도차는 벽면 충돌 시 액적의 온도에 의해 크게 차이가 나기 때문에 어느 경우에서 액적의 온도상승이 용이한지는 단정 짓기 어렵다. 그러나 벽면온도가 높을수록 벽면근처의 분위기온도가 높기 때문에 벽면충돌 전후의 액적이 주위기체로부터 열을 받아 증발하는 비율은 천이비등과 비교해 막비등의 경우가 크고, 따라서 그 주위기체로부터 열을 받아 막비등의 경우가 고농도증기의 형성범위가 넓어졌다고 판단된다.

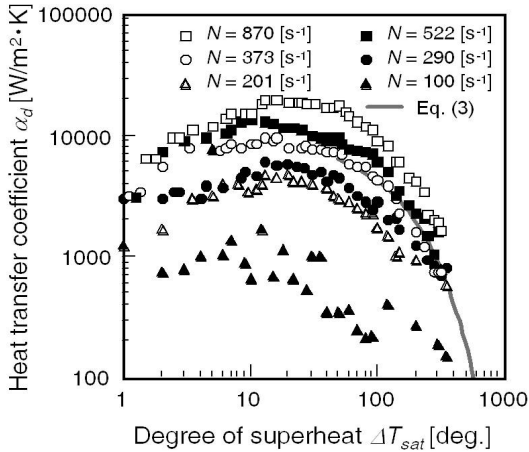


Fig. 9 Change in heat transfer coefficient with super heat¹⁰⁾

$$Q = \alpha_d \cdot S_d \cdot \tau_d \cdot \Delta T \quad (1)$$

[여기서, α_d : 벽면에서 액적으로의 열전달률, W/m^2K , S_d ¹¹⁾: 벽면과 액적과의 접촉면적, m^2 , τ_d ¹²⁾: 액적의 벽면상에서 체류시간, s , DT : 벽면온도 T_w 와 액적온도 T_l 의 온도차($=T_w - T_l$)K이고, 이 열량이 모두 액적의 온도상승에 이용된다고 하면 액적의 상승온도 DT_l , K는 식(2)로 구함.]

$$\Delta T_l = \frac{Q}{M \cdot C_p} = \frac{\alpha_d \cdot S_d \cdot \tau_d \cdot \Delta T}{M \cdot C_p} \quad (2)$$

[여기서, M : 액적의 질량, kg , C_p : 액적의 비열 $J/kg \cdot K$ 임.]

$$\alpha_d = 9084 \times 10^{-0.003 \Delta T_{sat}} \quad (3)$$

[여기서, DT_{sat} : 벽면과열도, K 임.]

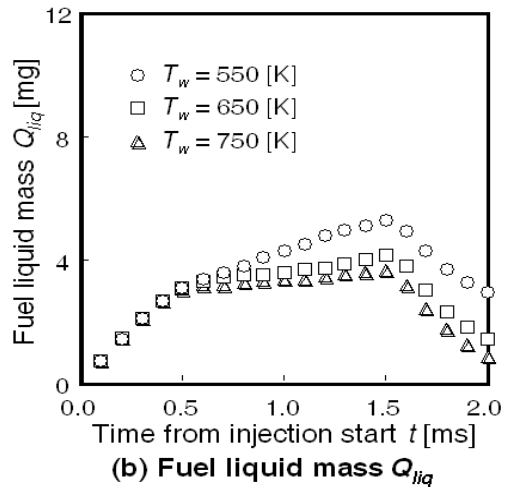
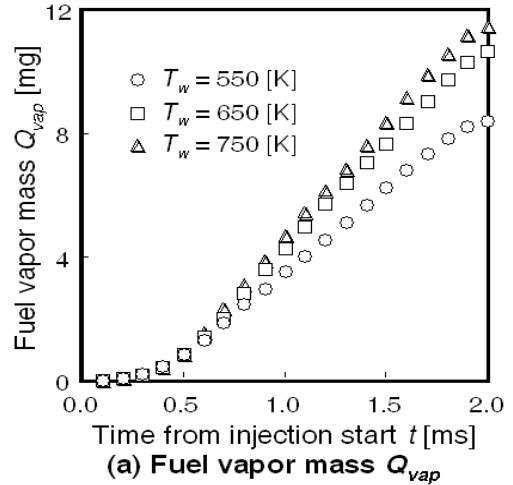


Fig. 10 Temporal change in fuel vapor mass and fuel liquid mass($p_{inj}=72[MPa]$, $Z_w=40[mm]$)

Fig. 7의 액적 parcel 공간분포에 있어서 천이비등과 막비등의 경우인 (b), (c)에서 벽면 상에 존재하는 액적이 비교적 작고, 증기형성이 활발히 일어나고 있는 것을 알 수 있다. 그 액적들의 속도 분포를 나타낸 Fig. 8에서는 벽면충돌초기($t=0.5ms$)에서 각 비등형태는 거의 동일한 거동을 나타내고 있지만, 특히 핵비등영역에 있어 액막이 형성되고 그 액막에 계속해서 액적이 충돌하는 $t=1.0$,

1.5ms의 경우 (a)에서는 액적이 반경방향으로 퍼지기 때문에 불규칙한 방향을 가지는 속도벡터를 관찰 할 수 있다. 또한 액막이 형성되지 않은 (b), (c)에 있어서는 벽면상의 속도벡터가 비교적 동일한 방향을 가지고, 급격한 비등으로 인해 분열액적은 반경방향으로 비산하고 있는 현상을 알 수 있다.

Fig. 10에 기상 및 액상 연료량의 시간변화를 나타낸다. 핵비등, 천이비등, 그리고 막비등의 순으로 연료증기량이 증가하고, 반면에 액적질량은 감소하고 있다. 이것으로부터 전술한 것과 같이 핵비등영역에서는 액막의 형성에 의해 벽면 상에서의 증기생성이 완만하게 되고, 또한 주위기체의 온도차에 의해 천이비등보다도 막비등의 경우가 증기량의 발생이 많다.

4. 결 론

이 연구에서는 비정상분무에 있어서 연료의 증발, 확산 및 분위기체와의 혼합과정을 해석하는 것을 목적으로 하고, 벽면충돌분무를 대상으로 벽면온도와 연료포화온도를 고려한 벽면과열도를 이용해서 수치해석을 실시하였다. 그 결과를 다음과 같이 정리한다.

(1) 벽면과열도가 핵비등영역에 있는 경우 벽면상의 증기는 액막이 고온벽면으로부터 받는 열에 의해 증발하여 형성된 증기가 지배적으로 되고, 모든 액적이 비교적 건조한 상태의 벽면에 충돌해 고온벽면으로부터 직접 열이 전달되는 천이영역과 막비등과 비교해 벽면상의 증기농도가 감소한다.

(2) 핵비등, 천이비등, 그리고 막비등의 순으로 연료증기량이 증가하고 반면에 액적질량은 감소한다. 이것으로부터 핵비등영역에서는 액막의 형성에 의해 벽면 상에서의 증기생성이 완만하게 되고, 또한 주위기체의 온도차에 의해 천이비등보다도 막비등의 경우가 증기량이 많이 발생하는 것을 알 수 있다.

후 기

이 논문은 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임(2012-0003650).

참고문헌

1. J. Senda, T. Kanda, T. M. Al-Roub and P. V. Farrell, T. Fukami and H. Fujimoto, 1997, "Modeling Spray Impingement Considering Fuel Film Formation On the Wall", Journal of Society of Automotive Engineers, No. 970047.
2. S. Furuhashi and H. Suzuki, 1979, "Temperature Distribution of Piston Rings and Piston in High Speed Diesel Engine", Journal of The Japan Society of Mechanical Engineers(B), Vol. 22, No. 174, pp. 1788-1795(in Japanese).
3. T. Murayama, 1969, "An Experimental Study on the Performance of a Multifuel Engine : Part3 An Attempt of M-Combustion Applied to a Swirl Chamber," Journal of The Japan Society of Mechanical Engineers(B), Vol. 35, No. 274, pp. 1310-1319(in Japanese).
4. S. Kusano, 1997, "Analysis of the unsteady spray accompanying with change of phase", MS thesis, Doshisha University, Kyoto, Japan.
5. T. Dan, 1996, "Turbulent structure and formation mechanism of diesel sprays", Ph. D. thesis, Doshisha University, Kyoto, Japan.
6. T. Dan, S. Takagishi, J. Senda and H. Fujimoto, 1997, "Organized Structure and Motion in Diesel Spray", Journal of Society of Automotive Engineers, No. 970641.
7. J. K. Yeom, 2009, "Study on the Behavior Characteristics of the Evaporative Diesel Spray under Change in Ambient Conditions", Journal of Korea Society of Mechanical Engineers(B) Vol. 33, No. 6 pp. 454-460.
8. J. Senda, T. Kanda, S. Kusano and H. Fujimoto,

- 1999, "Modeling on Dispersion and Mixture Formation of spray Impinging on the Wall Considering Film Formation and Droplet-Film Interaction", Journal of The Japan Society of Mechanical Engineers(B), Vol. 65, No. 629, pp. 389-396(in Japanese).
9. J. K. Yeom, 2010, "An Experimental Analysis on the Behavior Characteristics of Evaporative Impinging Spray," Journal of The Korean Society for Power System Engineering, Vol. 14. No. 2, pp.16-21.
10. J. Senda, K. Yamada, H. Fujimoto and H. H. Miki, 1987, "The Heat Transfer Characteristics of a Small Droplet Impinging upon a Hot Surface", Journal of The Japan Society of Mechanical Engineers(B), Vol. 53, No. 485, pp. 176-182(in Japanese).
11. J. Senda, K. Yamada, K. Takeuchi and H. Miki, 1986, "Deformation and Breakup Behavior of a Small Droplet Impinging upon a Hot Surface", Journal of The Japan Society of Mechanical Engineers(B), Vol. 52, No. 481, pp. 3372-3379(in Japanese).
12. G. T. Sato, T. Suzuki and N. Tokuoka, 1985, "Experimental Study on the Behavior of the Drop Impinging upon a Hot Surface : 1st Report, Disintegration Patterns and Deformation of a Drop", Journal of The Japan Society of Mechanical Engineers(B), Vol. 51, No. 481, pp. 1703-1711(in Japanese).