

분사압력변화가 충돌분무특성에 미치는 영향에 관한 수치적 고찰

박 권 하* · 김 승 철**

Numerical Analysis of the Effect of Injection Pressure Variation on Impaction Spray Characteristics

K. Park* · S. C. Kim**

Key words : Impaction Spray(충돌분무), Injection Pressure(분사압력), Vapor Fraction(증발분)

Abstract

Small compression-ignition direct injection engines have been developed as a measure to improve a fuel efficiency and reduce harmful exhaust gases. Those small engines generally employ high injection pressure systems, so the spray injected in high speed easily reaches on walls and make a fuel film.

The effect of an injection pressure increase on the spray impacting on a wall is discussed in this paper. The gas phase is modelled by the Eulerian continuum conservation equations of mass, momentum, energy and fuel vapour fraction. The liquid phase is modelled following the discrete droplet model approach in Lagrangian form, and the droplet wall interaction is modelled as a function of the velocity normal to impaction lands.

The droplet distributions, vapor fractions and gas flows are analyzed in various injection pressure cases. The penetrations of wall spray and vapor increase and the Sauter mean diameter decreases with increasing injection pressure.

기호설명

U^i : normal flux component

u^i : cartesian components of a velocity vector

\sqrt{g} : Jacobian determinant

P_{ij} : cartesian components of the area vector

q_{ij} : geometric relations

μ_{eff} : effective viscosity

θ : void fraction

Sh : Sherwood number

D : diffusivity

D_d : droplet diameter

* 정회원, 한국해양대학교(원고접수일 : 98년 9월)

** 정회원, 한국기계연구원

T_m : mean temperature

1. 서 론

소형디젤엔진의 개발은 에너지절약 및 CO₂ 저감측면에서 세계적으로 진행되고 있으며 이는 소형승용차에 적용이 시작되는 단계이다. 이러한 소형디젤기관은 대부분 고압분사시스템을 적용하고 있다. 고압으로 분사된 연료분무는 작은 연소실의 벽면에 쉽게 충돌하며 벽면에 유막을 형성하게 된다. Guerrassi 등¹⁾은 엔진의 전부하, 전속도 영역에서 저압에서 고압(15 - 160MPa)까지 분사압을 조절할 수 있는 승용차용 고압분사시스템을 발표하였으며, Sasaki 등²⁾은 압력변화에 따른 분무거동을 PIV기술을 이용하여 분석하였고 Kamimoto 등^{3,4)}은 급속압축기에서 고압분사가 soot형성에 미치는 영향을 연구하는 등 고압분사엔진에 관한 많은 연구^{5,6,7,8,9)}가 진행되고 있다. 하지만 실험의 어려움 때문에 증발조건에서 고압분사가 벽면충돌분무에 미치는 영향을 분석한 논문은 거의 없다.

본 논문에서는 고압분사가 벽면분무진행거리, 공기와의 혼합, 증발율에 미치는 영향을 검토하기 위하여, 분사압력을 변화시키면서 그들의 특성을 분석한다.

2. 수학적 모델

기상의 유동에 대하여는 연속방정식, 운동량방정식, 에너지방정식 및 연료증발방정식이 Eulerian형으로 주어지며, 고압축성유동에 대한 $k-\epsilon$ 모델이 적용된다. 액상의 유동에 대하여는 움직이는 궤적, 운동량, 질량 및 에너지방정식은 Lagrangian형으로 쓰여지며, 각 액적군은 크기, 온도, 속도 등 모든 성질이 동일한 수천 개의 액적으로 이루어진다. 액상에 대한 기상의 영향은 액상의 방정식에서 전단응력의 항으로 고려되며, 기상에 대한 액상유동의 영향은 기상의 방정식에서 생성항의 형태로 고려된다. 속도/압력쌍의 해석은 PISO 알고리즘을 사용하여 해석된다.

일반좌표계(ξ)로 변형된 기상의 전달방정식은 다음과 같이 일반텐서표시법과 함께 표현된다.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\theta\rho\Phi) + \frac{1}{\sqrt{g}} \frac{\partial}{\partial \xi^i}(\theta\rho\Phi U^i\Phi - \frac{\theta\Gamma q_{ij}}{\sqrt{g}} \frac{\partial\Phi}{\partial \xi^j}) = \theta S_\Phi + S_\Phi^d \quad (1)$$

여기에서 U^i 는 수직유동항, w 는 속도벡터 \bar{V} 의 직교좌표성분이며, P_{ij} 는 면적벡터의 직교좌표성분이다.

액적의 질량전달방정식(droplet mass transfer)은 El Watkil 등¹⁰⁾에 의하여 실험과 이론에 의하여 제시된 식(2)를 사용한다.

$$\frac{dm_d}{dt} = -\pi D_d D \frac{P_t}{R_f T_m} \ln \frac{P_t - P_{v,\infty}}{P_t - P_{v,s}} Sh \quad (2)$$

여기서 P_t 는 전체압력, D 는 확산(diffusivity), R_f 는 증발연료의 기체상수, T_m 은 평균액적표면온도, $P_{v,\infty}$, $P_{v,s}$ 는 각각 자유공간 및 액적표면에서의 증발연료압력(partial pressure of the fuel vapour far from or at the surface of droplet) 그리고 Sh 는 셔우드수를 나타낸다. 액적간의 충돌 및 분열현상은 각각 O' Rourke와 Bracco¹¹⁾, Reitz와 Diwaker¹²⁾에 의하여 제시된 모델을 사용한다.

분무액적의 벽면충돌모델은 개별액적의 실험결과(Araki 와 Moriyama¹³⁾, Jayaratne 과 Mason¹⁴⁾, Wachters 와 Westerling¹⁵⁾에 기본을 두고 있다. 이들 실험은 충돌후 액적이 충돌면의 수직방향과 수평방향으로 나뉘어 거동됨을 보여주고 있으며, 역시 충돌전 액적의 웨버넘버에 의존함을 보여준다. 이들 실험에 기본을 두고 안정영역과 불안정영역으로 분리하여 모델링하였으며 이는 박 등^{16,17,18,19)}에 의하여 많은 실험결과와 비교 검증되었다. 그 모델을 요약하면 다음과 같다.

$We < 80$ 인 경우;

$$v_{an} = -\alpha v_{bn} \quad (3)$$

$$v_{at} = v_{bt} \quad (4)$$

$$D_{da} = D_{db} \quad (5)$$

$We > 80$ 인 경우;

$$v_{an} = -R_{xx} \left(\frac{\sigma We_a}{\rho D_{da}} \right) 0.5 \quad (6)$$

$$v_{at} = v_{bt} \pm R_{xx} v_f \quad (7)$$

$$D_{da} = \frac{D_{db}}{N^{\frac{1}{3}}} \quad (8)$$

3. 계산 조건

본 계산은 분무 및 증발연료를 실험적으로 분석한 Suzuki 등²⁰⁾의 실험조건을 기준으로 한다. 분사압력의 효과를 비교분석하기 위하여 10 MPa에서 고압분사시스템의 한계값인 200 MPa까지를 계산조건으로 선정하였다. 계산격자의 효과를 제외하기 위하여 기준조건에서 사용한 격자를 모든 경우에 동일하게 적용하였으며, 분사율을 동일하게 유지하기 위하여 다음 식으로부터 분공의 크기를 결정하였다.

$$\dot{Q}_{inj} = A \cdot U_{inj} = constant \quad (9)$$

여기에서 \dot{Q}_{inj} 은 분사율을 나타내며, 분공면적(A)과 분사평균속도(U_{inj})는 다음과 같이 주어진다.

$$A = \frac{\pi d^2}{4} \quad (10)$$

Table 1. Test cases

	Base	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	Case 5	Case 6
Inj. press.(MPa)	19.6	10	20	30	50	100	200
Nozzle hole dia.(mm)	0.25	0.310	0.249	0.222	0.193	0.161	0.135
Gas press.(MPa)	2.9	2.9	2.9	2.9	2.9	2.9	2.9
Gas temp.(K)	773	773	773	773	773	773	773
Wall Dist.(mm)	24	24	24	24	24	24	24

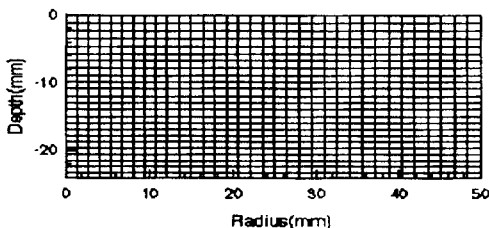


Fig. 1 Calculation grids

$$U_{inj} = C_d \sqrt{\frac{2(P_{inj} - P_{trap})}{\rho_d}} \quad (11)$$

이상의 결과로부터 계산조건은 Table 1과 같이 주어지며, 계산격자는 Fig. 1과 같다.

4. 결과 및 고찰

4.1 분무형상

Fig. 2는 시간에 따른 액적분포의 변화를 나타낸 것으로서 위로부터 분사후 0.25, 0.5, 0.75, 1.0, 1.25, 1.5msec 시간이 경과한 상태를 나타낸다. 종축의 좌측상단이 노즐의 위치이며 횡축이 충돌벽면을 나타내고 있다. 분사압력이 가장 낮은 Case 1의 경우 분무의 진행거리가 가장 작고, 액적들의 밀도가 분무축을 중심으로 높게 나타나며 충돌 후에도 벽면을 따라 액적의 밀도가 높은 것을 알 수 있다. 분사압력이 증가하면서 벽면진행거리는 점점 증가되고 액적밀도는 낮아지며 충돌후의 밀도도 낮아진다. 하지만 압력의 급격한 증가와 비교할 때 분무거리의 증가 및 충돌후의 벽면진행거리의 증가는 둔화되어진다. 분무 및 충돌후의 형상은 모든 경우에 있어서 유사하지만 압력의 증가와 함께 넓게 분산되며 분무선단에서 위쪽 밖으로 분산되는 액적들이 현저하게 줄어들고 충돌 후에 벽면을 따라 진행하는 액적밀도도 줄어든다. 이는 고압분사의 경우 액적의 분사속도가 증가함으로써 많은 액적들이 활발한 주위공기유동과의 상호작용에 의하여 쉽게 증발되며 또한 운동량의 증가로 충돌후의 미립화가 촉진되어 증발량이 증가되었음을 말해준다.

4.2 증발연료 분포

연료증발분포를 나타내는 Fig. 3은 Case 1과 Case 6의 시간경과(Fig. 2와 동일)에 따른 증발분포의 형상변화를 보여 준다. 저압분사인 Case 1의 경우에는 분무형상에서 알 수 있는 것처럼 분무축과 충돌벽면을 중심으로 좁게 분포함을 보여 주며 고압분사인 Case 6의 경우에는 증발연료가 넓게 분포함을 보여 준다. 액적분포에서는 폭방향의 퍼

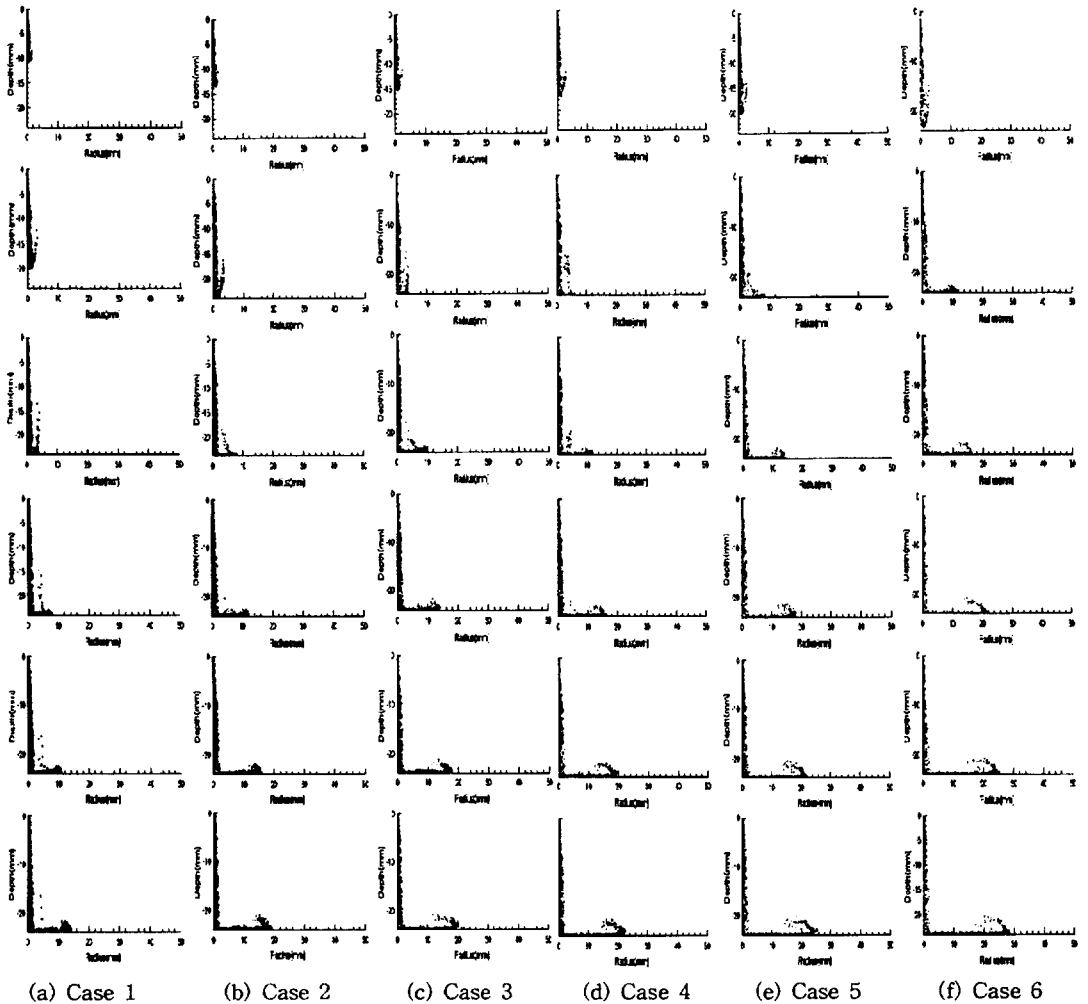


Fig. 2 Comparison of spray shapes at 0.25ms, 0.50ms, 0.75ms, 1.00ms, 1.25ms and 1.50ms

침이 압력증가에 크게 영향을 받지 않지만, 증발분포에서는 압력증가와 함께 크게 증가됨을 보여 준다. 이는 폭발방향으로 분산되는 액적들의 크기는 대부분 작고, 또한 충돌로 인하여 작은 액적들이 많이 발생되기 때문에 주위의 공기유동과의 활발한 상호작용으로 쉽게 증발되어 액적들은 사라지게 되고 대신 증발분포의 폭은 넓게 됨을 의미한다.

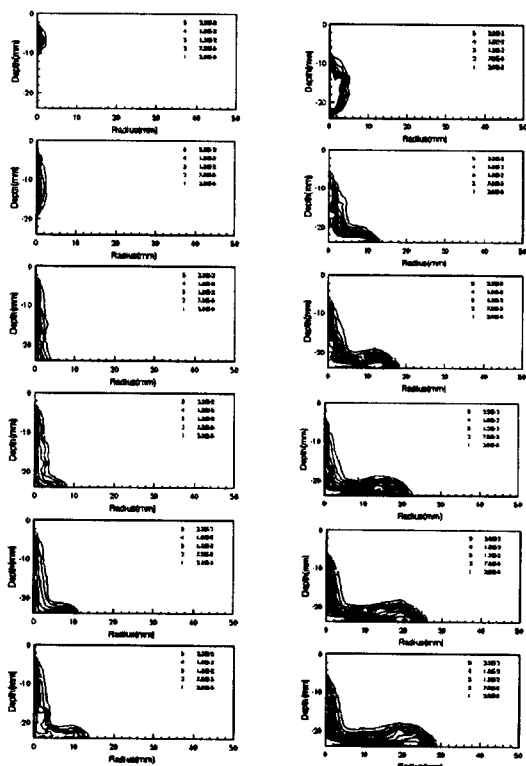
4.3 유동특성

Fig. 4는 분사후 1.5msec후의 공기유동상태를 보여 준다. 액적분포나 증발분포에서 보여준 것처럼 유동 역시 저압분사의 경우에는 분무축과 충돌

벽면에 근접하여 분포되나 고압분사의 경우는 보다 넓게 분포하며 충돌후의 분무선단은 폭발방향으로 소용돌이 유동을 나타내며 고압분사일수록 그 정도가 커짐을 보여준다. 이는 충돌벽면의 퇴적현상이 감소되는 효과를 기대할 수 있다고 사료된다.

4.4 벽면분무 진행거리

Fig. 5는 충돌 후 시간경과에 따른 벽면분무선단 거리를 나타낸다. 분사압력의 증가와 함께 모든 시간영역에서 거리가 증가하나, 저압분사의 경우 벽면분무선단거리가 시간의 증가와 함께 비례적으로 증가하는데 반해, 고압분사의 경우에는 시간의



(a) Case 1 (b) Case 6

Fig. 3 Comparison of vapour fraction

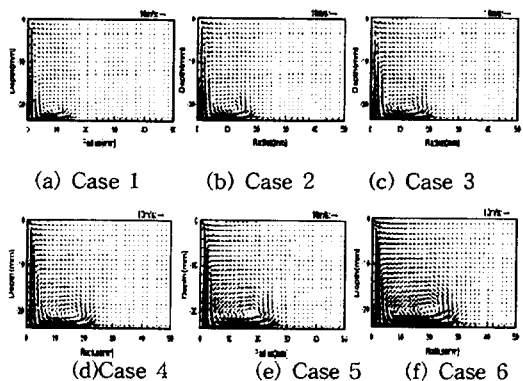


Fig. 4 Comparison of flow vectors at 1.5ms from injection

증가와 함께 증가율이 크게 둔화됨을 보여 준다. 이는 충돌면이 없는 상태의 분부진행거리와 유사한 특성이라 할 수 있다.

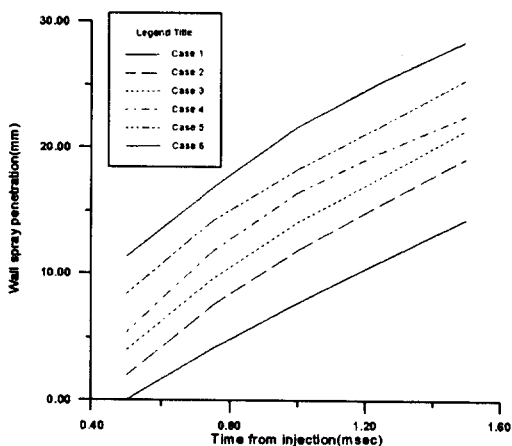


Fig. 5 Comparison of wall spray penetration

4.5 액적크기 및 증발

Fig. 6, 7은 각각 분사후 시간에 대한 액적평균 직경(SMD)과 연료증발량을 나타낸다. SMD는 압력증가와 함께 감소하는 경향을 보인다. 이는 분사압력증가와 함께 액적이 넓은 범위에 분포되어 액적간의 충돌에 의한 응결(coalescence)기회를 감소시키며, 동시에 주위 공기유동의 활성화로 증발이 가속화되기 때문으로 생각된다. 또한 분사후 시간의 경과에 따라 대체적으로 증가하는 경향을 나타내나 벽면충돌 후에는 일정기간 작아지는 경향을 나타낸다. 이는 충돌에 의하여 미립화가 촉진되었기 때문이며, 이후 다시 액적크기가 증가하게 되는데 이는 충돌에 의하여 2차 미립화된 액적들이 벽면에 유막을 형성하면서 서로 응결하기 때문으로 사료된다. 특히 저압으로 분사되는 Case 1의 경우에는 그 효과가 더욱커서 충돌후의 액적증가가 급격해짐을 알 수 있다. 연료의 증발량은 0.1msec이전에는 거의 없지만 이후 시간경과 따라 증가하며 분사압력의 증가와 함께 증가한다. 이는 저온의 액적상태로 분사된 연료입자의 증발은 거의 없으며 입자의 온도가 일정조건(Wet temperature condition)이 됨으로써 증발이 활발히 이루어지는 것을 나타낸다. 또한 충돌 후에는 미립화가 촉진됨으로 급속하게 증발량이 증가됨을 알 수 있다.

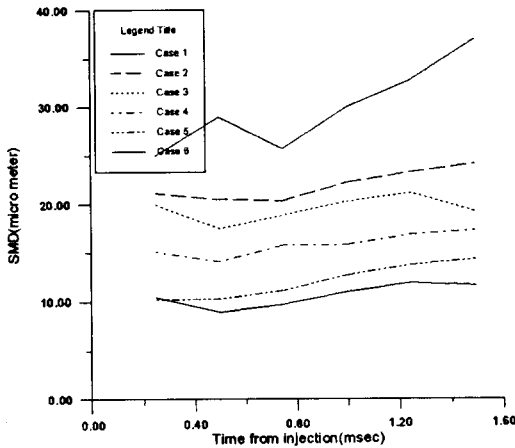


Fig. 6 Comparison of SMD

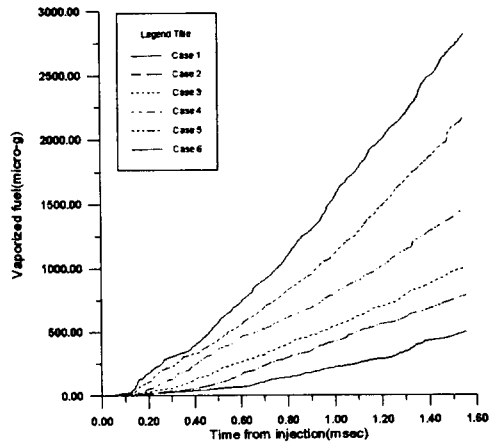


Fig. 7 Comparison of vaporized fuel

5. 결 론

분사압력변화가 충돌분무특성에 미치는 영향은 다음과 같이 정리된다.

- ▶ 저압분사의 경우에는 분무액적들이 분무축과 충돌벽면을 중심으로 밀도 높게 분포됨으로서 액적간의 응결에 의한 큰액적들을 생성하며 밖으로 분산되지 못한다. 한편 분사압력의 증가에 따라 충돌에 의한 미립화가 촉진되고, 주위공기 유동의 활성화와 함께 분무액적들이 더욱 멀리 넓게 분포함으로써 액적크기를 작게 하며 많은 증발량을 가져온다.
- ▶ 분사압력의 증가와 함께 벽면진행거리와 증발량이 증가되며, 액적평균직경은 감소함을 나타낸다. 특히 충돌에 의하여 SMD의 감소 및 증발량의 증가는 현저하여진다.
- ▶ 압력증가에 따른 분무특성변화는 저압영역에서는 크게, 고압영역에서는 둔화되었다.

이상의 분석 결과들로부터 고압분사는 충돌분무의 효과를 향상시켜 디젤기관의 연소효율향상을 가져올 것으로 예측된다. 하지만, 압력의 증가와 더불어 그 효과가 둔감함을 생각할 때, 고압화를 위하여 분사계에 추가되는 에너지소모량을 고려하여 전체 에너지효율을 최대로 할 수 있는 적절한 분사압력의 선택이 요구된다.

참고문헌

- 1) N. Guerrassi and P. Dupraz, "A common rail injection system for high speed direct injection diesel engines", SAE paper 980803, 1998.
- 2) S. Sasaki, H. Akagawa and K. Tsujimura, "A study on surrounding air flow induced by diesel sprays", SAE paper 980805, 1998.
- 3) T. Kamimoto, H. Yokota and H. Kobayashi, "Effect of high pressure injection on soot formation process in a rapid compression machine to simulate diesel flames", Transaction of the SAE, vol. 96, Sect. 4, pp. 4.783 - 791, 1987.
- 4) C.N. Yen, T. Kamimoto, S. Kobori and H. Kosaka, "2d imaging of fuel vapor concentration in a diesel spray via exciplex - based fluorescence technique", SAE paper 932652, 1993.
- 5) T. Kato, T. Koyama, K. Sasaki, K. Mori and K. Mori, "Common rail fuel injection system for improvement of engine performance on heavy duty diesel engine", SAE paper 980806, 1998.
- 6) T. Minami, et al, "Analysis of fuel characteristics and combustion phenomena under high pressure fuel injection", SAE paper 900438 (1990).
- 7) M. Nishida, et al, "Observation of high pressure fuel spray with laser light sheet method", SAE paper 920459 (1992).
- 8) K. Nishizawa, et al, "A new concept of diesel fuel

- injection timing and injection rate control system", SAE paper 870434 (1987).
- 9) M. Miyaki, et al, "Development of new electronically controlled fuel injection system ECD - U2 for diesel engines", SAE paper 910252 (1991).
 - 10) M.M.E Watkil, O.A. Uyehara, and P.S. Myers, "Atomization of multi fuel sprays", ICLASS - 82, No. 9.3 (1982), pp.237 - 244.
 - 11) P.J. O' Rourke and F.V. Brocco "Modelling of drop interactions in thick sprays and a comparison with experiment", In Stratified Charge Automotive Engine Conf. I.Mech.E (1980).
 - 12) R.D. Reitz and R. Kiwakar, "Effect of drop break - up on fuel sprays", SAE 860469 (1986).
 - 13) K. Araki and A. Moriyama, "Deformation behaviour of a liquid droplet impinging on a hot metal surface", In Int. Cont. on Liquid Atomization and Spraying Systems ICLASS - 82 (1982).
 - 14) O.W. Jayaratne and B.T. Mason, "The coalescence and bouncing of water drop at air/water interface", Proc. R. Soc. Lond - A 280 (1964), p.545.
 - 15) 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, 21 (1966), p.1047.
 - 16) K. Park and A.P. Watkins, "The effect of non - orthogonal grids on spray and air flow predictions", KSME Journal, vol. 10, no. 4, pp. 458 - 470, 1996
 - 17) K. Park and A.P. Watkins, "Comparison of wall spray impaction models with experimental data on drop velocities and sizes", International Journal of Heat and Fluid Flow, vol.17 no.4, pp. 424 - 438, 1996.
 - 18) K. Park and A.P. Watkins, "An investigation of combustion chamber shapes for small automotive direct injection diesel engines employing spray impaction", Journal of Automobile Engineering, I.Mech.E, vol 210, no D3, pp. 261 - 272, 1996.
 - 19) K. Park and A.P. Watkins, "Assessment and application of a new spray wall impaction model", Transaction of Computers in Reciprocating Engines and Gas Turbines, I.Mech.E, pp. 1 - 10, 1996.
 - 20) M. Suzuki, K. Nishida and H. Hiroyasu, "Simultaneous concentration measurement of vapour and liquid in an evaporating diesel spray", SAE paper 930863 (1993).

저 자 소 개



박권하(朴權夏)

1960년 9월생, 1982년 성균관대학교 기계공학과 졸업, 1991년 영국 맨체스터대학교 기계공학과 열유체분야 졸업(석사), 1995년 동대학원 내연기관분야 졸업(박사), 1983년~1990년 현대자동차, 1995 - 1998년 한국기계연구원, 1998년~현재 한국해양대학교 기계·냉동·자동차공학부 교수, 당학회 회원.



김승철(金承哲)

1960년 11월생, 1986년 서울산업대학교 기계공학과 졸업, 1989년 동경대학교 기계공학과 졸업(석사), 1994년 동대학원 졸업(박사), 1994년~1997년 쌍용자동차 엔진 연구실, 1997년~현재 한국기계연구원 엔진환경연구부 위촉연구원, 당학회 회원.