

상변화를 동반한 충돌분무의 거동해석

송홍중* · 차건중** · 김덕줄**

(1999년 10월 26일 접수)

Analysis of the Impinging Spray Behavior Accompanying with Change of Phase

Hong-Jong Song, Keun-Jong Cha and Duck-Jool Kim

Key Words: Impinging Spray(충돌분무), Spray Characteristics(분무특성), Impaction Part(충돌부) Spray Width Ratio(분무폭비), Penetration Ratio(관통길이 비)

Abstract

The emission in the exhaust gas from diesel engine is effected by the fuel spray characteristics. The spray of D.I. diesel engine impinges on a piston cavity and a cylinder wall. It is very important to know exactly the distribution and behavior of the spray inside cylinder. The objective of this study is to develop more accurate evaporation model. The EPISO code was used to analyze the flow characteristics in the engine. The Wakil model and the Faeth model are applied to the EPISO code to analyze the behavior of impinging spray. And also experimental and numerical analysis were carried out. The spray behavior characteristics were investigated by changing injection pressure, ambient pressure and temperature. The behavior of impinging spray was strongly effected by the change of ambient pressure and temperature. The effects of evaporation and rebounding droplet should be considered.

기호설명

b : 상부방향의 분무폭 [mm]
 b_{max} : 분무의 상부방향 폭의 최대치 [mm]
 C_{pd} : 액적의 정압비열
 C_{pv} : 연료증기의 정압비열
 D : 충돌원판의 직경 [mm]
 D_d : 액적의 직경 [mm]
 d_n : 노즐의 직경 [mm]
 H : 충돌원판의 높이 [mm]
 k : 열전도도
 Le : Lewis 수
 m_d : 액적의 질량
 Nu : Nusselt 수

$P_{f\infty}$: 분위기 기체의 증기압력 [MPa]
 P_{fs} : 액적표면에서의 증기압력 [MPa]
 P_g : 분위기 기체의 압력 [MPa]
 P_i : 분사압력 [MPa]
 Pr : Prandtl 수
 Q : 액체의 증발잠열
 R : 기체상수
 R_b : 보어반경 [mm]
 R_p : 분무의 반경방향 관통길이 [mm]
 Re : Reynolds 수
 Sc : Schmidt 수
 Sh : Sherwood 수
 T_d : 액적의 온도 [K]
 T_g : 분위기 기체의 온도 [K]
 t_i : 분사 후 경과시간 [ms]
 T_m : 액적과 공간가스의 평균온도 [K]
 Y_f : 가스 혼합물에서의 연료의 질량분율
 Y_{fs} : 액적표면에서의 연료의 질량분율

* 부산대학교 대학원

** 회원, 부산대학교 기계기술연구소

E-mail : djkim@pusan.ac.kr

TEL : (051)510-3072 FAX : (051)516-9598

그리스문자

ρ_K : 분위기 기체의 밀도

μ : 액적의 점성계수

Γ : 기체의 확산계수

1. 서론

내연기관은 다양한 용도로 산업분야에 사용되고 있다. 최근 환경오염에 대한 규제 강화와 화석 연료의 고갈로 인해, 환경오염방지를 위한 엔진의 유해 배출물의 저감에 대해, 그리고 연비향상을 위한 엔진성능 개선을 위해 다양한 방향으로 연구가 진행되고 있다. 소형 디젤엔진의 경우, 유해 배출물 저감을 위해 분사압이 높아지고, 직접 분사하는 경향을 나타내고 있다. 분사압이 높아짐에 따라, 연료 분무의 피스톤 공동이나 실린더 벽면에서의 충돌이 불가피하게 되었다. 분사압의 고압화는 연료 분무의 운동량의 증가에 의해 연료-주위기체와의 혼합기 생성을 촉진시키고, 미립화를 향상시키지만, 벽면에 부착되는 연료가 미연탄화수소와 매연의 생성원인이 된다.⁽¹⁾ 이 문제를 극복하기 위해 충돌분부에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.^(2,3)

본 연구에서는 PISO 알고리즘⁽⁴⁾을 엔진내부의 유동에 맞게 확장시킨 Engine PISO(EPISO) 알고리즘⁽⁵⁾을 기초로 한 알고리즘으로서 분무와 가스 운동과의 상호관계를 고려한 분무 EPISO 알고리즘⁽⁶⁾을 사용하였다. 이 분무 EPISO 알고리즘은 선행연구를 통해 실험 및 계산결과의 일치성을 검증한 바 있고, 엔진내부의 연료 분무의 거동특성을 분석하는데 많이 이용하고 있다. Park 등^(7,8)은 비-직교 격자생성 코드를 추가하였고, Ryoo 등⁽⁹⁾은 충돌부의 변화에 따른 분무형성에 대하여 연구하였다. 본 연구에서는 중발, 비중발조건에서 상변화를 통한 충돌분부의 거동특성을 연구하기 위하여 먼저 기존 코드를 이용한 계산결과와 실험결과를 비교하여 발생하는 차이의 원인을 규명하고, 이것을 토대로 새로운 서브모델을 EPISO 알고리즘에 적용하여, 실험결과와 비교하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

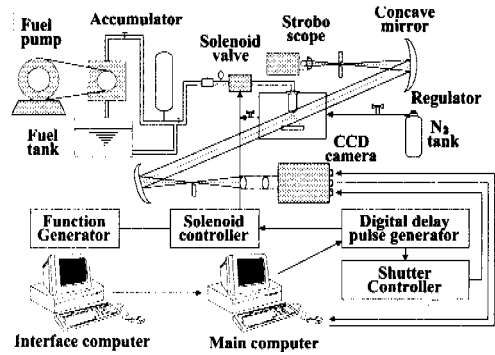


Fig. 1 Schematics of experimental apparatus

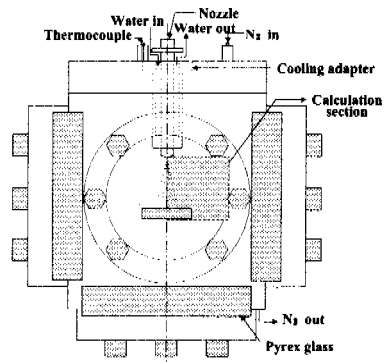


Fig. 2 Details of spray chamber

Fig. 1은 본 연구에 사용된 전체적인 실험장치를 나타낸다. 실험장치는 연료 분사계, 정압·정적분부실, 분무의 가시화를 위한 슈리렌 장치 그리고 분부상을 획득하고 분석하기 위한 화상 처리 시스템 등으로 구성되어 있다.

Fig. 2는 실험에서 사용된 고압-정적 분부실의 상세도이다. 분부실은 질소를 이용하여 고압의 정적 분위기로 유지시키고, 고온의 분위기를 만들기 위해 앞면과 옆면 및 아래쪽에 히터를 설치하여 간접열에 의해 분부실 내부가 가열되도록 하였다. 가시화를 위해 관측창을 양쪽 측면과 정면에 만들고, 관측창의 재질은 고온 및 고압에 견딜 수 있는 강화유리이고 두께는 15mm, 외경은 130mm이다. 분부실의 재질은 알루미늄 합금이고 본체의 형상은 한 변의 길이가 200mm인 정육면체이다. 분부실의 내경은 100mm, 길이는 200mm이다. 그리고, 점선으로 표시된 사각형은

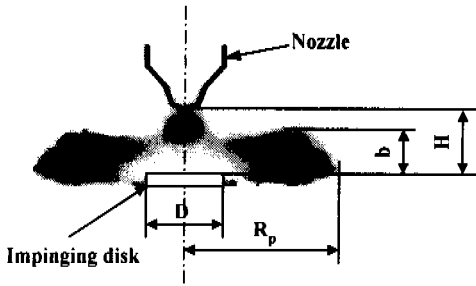


Fig. 3 Definition of variables for impinging spray

계산을 수행하기 위해서 경계를 설정한 부분을 나타내고 있다. 분무가 분무의 중심축에 대해 대칭이라는 가정을 전제로, 그림과 같이 분무의 반경방향으로 한 부분만 계산하였다.

2.2 실험방법 및 변수정의

2.2.1 변수정의

Fig. 3은 충돌분무의 거동특성을 해석하기 위해 정의된 변수를 나타낸다. 원판에 충돌 후 형성된 분무의 형상은 각 요소에 따라서, 충돌면으로부터 상부 방향 분무폭을 분무두께(b), 노즐로부터 충돌판까지의 높이를 H, 충돌판의 중심에서 반경방향 분무 선단 도달거리를 충돌분무의 관통길이(R_p), 충돌원판의 지름(D)로 정의하였다.

2.2.2 실험방법

Table. 1은 본 연구에 적용한 실험조건들을 나타낸 것이며, 이와 동일한 조건에서 계산을 수행하였다. 연료는 경유를 사용하였고, 모터에 의해 구동되는 연료 분사펌프에서 맥동제거 및 압력저장을 위하여 설치된 축압기를 거쳐 인젝터로 공급된다. 인젝터는 노즐은 직경이 0.61mm이고, 수직 단공형이다. 충돌분무를 형성시키기 위해 노즐 팁 아래에 원형 충돌판을 설치하였다.

본 연구에서는 Kim 등⁽¹⁰⁾에 의해 제시된 가장 양호한 공간분포를 나타내는 노즐 팁으로부터 충돌판까지의 거리가 6mm이고, 충돌판의 직경이 7mm인 경우를 사용하였다. 연료 분사시간은 5ms로 하고, 분사압력, 분위기 압력 그리고 분위기 온도를 변화시켜 충돌분무의 거동에 미치는 영향을 조사하였다.

Table 1 Experimental conditions

Injection pressure, P_i (MPa)	14.7, 18.62
Ambient pressure, P_g (MPa)	0.1, 2.94, 3.72
Ambient temperature, T_g (K)	300, 500, 600
Injection duration, Δt_i (ms)	5
Nozzle hole diameter, d_n (mm)	0.61
Dia. of impinging disk, D (mm)	9
Impinging distance, H (mm)	6

3. 수치해석

3.1 수학적 모델

수치해석은 기존의 코드에 사용하던 증발모델인 Wakil모델⁽¹¹⁾을 강제대류 및 분무의 농도에 의한 영향을 고려한 Faeth모델^(12,13)로 수정하여, EPISO 코드에 첨가하였고, 두 모델에 대하여 계산한 결과와 실험결과를 비교, 분석하였다.

3.1.1 Wakil에 의해 제안된 모델

액적의 질량과 열전달 방정식의 Lagrangian 형태는 다음과 같다.

$$\frac{dm_d}{dt} = -\pi D_d \Gamma \ln \left(\frac{P_g - P_{f\infty}}{P_g - P_{fs}} \right) Sh \frac{P_g}{RT_m} \quad (1)$$

$$m_d \frac{d(C_{pd} T_d)}{dt} = \pi D_d k (T_g - T_d) \left(\frac{z}{e^z - 1} \right) Nu + Q \frac{dm_d}{dt} \quad (2)$$

그리고, z 는 다음 식으로 주어진다.

$$z = -\frac{C_{pv} \frac{dm_d}{dt}}{\pi D_d k Nu} \quad (3)$$

Nusselt 수(Nu)와 Sherwood 수(Sh)는 다음과 표현된다.

$$Nu = 2.0 + 0.6 Re^{0.2} Pr^{0.333} \quad (4)$$

$$Sh = 2.0 + 0.6 Re^{0.2} Sc^{0.333} \quad (5)$$

여기서,

$$Pr = \frac{C_{pg}\mu}{k}, \quad Sc = \frac{\mu}{\rho\Gamma}, \quad Re = \frac{\rho D_d V_{rel}}{\mu}$$

이다.

3.1.2 Faeth에 의해 제안된 모델

구형으로 대칭이고, 준정적이라는 가정 하에, 강제 대류가 없을 때(Re=0)에서 액적 질량 변화를 \dot{m} 와 액적 표면에서의 열전달계수 h 는 해석적으로 기상 질량과 에너지 보존 방정식을 풀어서 다음과 같이 얻어질 수 있다.

$$\frac{dm_d}{dt} = \dot{m}|_{Re=0} = -2\pi D_d \rho_g \Gamma \ln\left(\frac{1 - Y_f}{1 - Y_{fs}}\right) \quad (6)$$

$$Nu|_{Re=0} = \frac{hD_d}{k} \Big|_{Re=0} = \frac{\dot{m}_{Re=0} C_{pg}}{\pi D_d k} \times \left[\exp\left(\frac{\dot{m}_{Re=0} C_{pg}}{2\pi D_d k}\right) - 1 \right]^{-1} \quad (7)$$

강제 대류 영향 때문에, Faeth모델은 식 (4), (5)와 비교되는 유사한 관계를 $Re < 2000$ 에 대하여 다음과 같이 제안했다.

$$\frac{h}{h_{Re=0}} = \frac{\dot{m}}{\dot{m}_{Re=0}} = 1 + \frac{0.278 Re^{1/2} (Pr \text{ or } Sc)^{1/3}}{\left(1 + \frac{1.232}{Re(Pr \text{ or } Sc)^{4/3}}\right)^{1/2}} \quad (8)$$

액적에 대한 질량과 열전달 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{dm_d}{dt} = -\pi D_d \rho_g \Gamma Sh \ln(1 + B_y) \quad (9)$$

$$m_d \frac{d(C_{pd} T_d)}{dt} = \pi D_d k (T_g - T_d) Nu \times \frac{\ln(1 + B_y)^{1/Le}}{(1 + B_y)^{1/Le}} + Q \frac{dm_d}{dt} \quad (10)$$

여기서,

$$Nu = 2 + \frac{0.556 Re^{1/2} (Pr)^{1/3}}{\left(1 + \frac{1.232}{Re(Pr)^{4/3}}\right)^{1/2}} \quad (11)$$

$$Sh = 2 + \frac{0.556 Re^{1/2} (Pr)^{1/3}}{\left(1 + \frac{1.232}{Re(Sc)^{4/3}}\right)^{1/2}} \quad (12)$$

$$Le = \frac{a}{\Gamma} = \frac{k}{\rho C_p \Gamma} \quad (13)$$

$$B_y = \frac{Y_{fs} - Y_f}{1 - Y_{fs}} \quad (14)$$

Wakil모델은 액적분포가 희박하다는 가정과 함께, 액적들간의 충돌·결합을 무시하고, 인접한 액적의 영향을 무시하고 있다. 그러나, Faeth모델은 농후한 분무에 대해서도 고려를 하고, 강제 대류의 영향을 고려하고 있기 때문에 좀 더 정확한 예측이 가능하리라고 생각되어 Faeth모델을 적용하였다.

3.2 계산격자

본 연구의 계산을 위해 연소실 내의 형상을 축대칭 2차원으로 가정하고, 연소실 전체의 높이는 10mm이고, 반경이 50mm인 격자를 생성하였다. 그리고, Kim 등⁽¹⁰⁾에 의해 가장 양호한 공간분포를 나타내는 노즐 팁으로부터 6mm인 곳에 충돌판의 직경이 9mm인 충돌판을 설치한 형상에 대해 격자를 생성하였으며, 39×19의 mesh를 사용하였고, 계산의 정도를 높이기 위해 충돌분무의 중심영역에는 세밀하게 격자를 생성하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1 증발분무와 자유분무의 비교

Fig. 5는 분사압이 14.7MPa, 분위기압이 대기

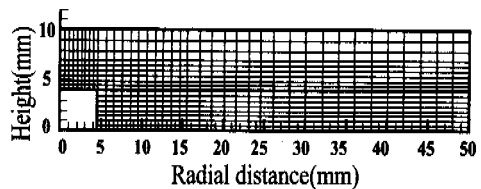


Fig. 4 Numerical grid of computation

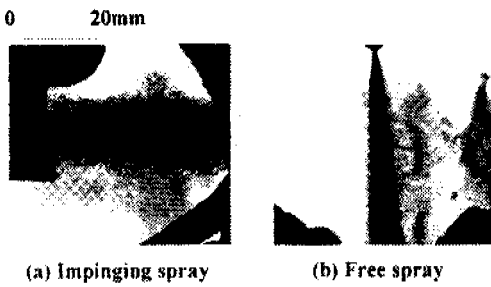


Fig. 5 Photographs for the comparison of impinging spray and free spray
 ($P_i=14.7\text{MPa}$, $P_g=0.1\text{MPa}$, $T_g=600\text{K}$, $t_i=3\text{ms}$)

압, 분위기 온도가 600k인 증발조건에서 분사 후 3ms에서의 충돌분무와 자유분무를 나타낸 것이다. 자유분무의 경우는 거의 증발현상이 보이지 않고, 충돌분무에 비해 공간분포가 좁음을 볼 수 있고, 분무 전체적으로 밀도가 높은 코어영역이 발달하여 있다. 반면에 충돌분무의 경우는 넓은 공간분포를 나타내고 있으며, 분무 가장자리에서 증발이 활발하게 일어나고 있다. 이것은 충돌분무의 경우 밀도가 높은 코어영역이 많이 붕괴되어 양호한 미립화로 인하여 연소시 배기오염물질의 저감에 좋은 영향을 미치게 된다.

4.2 분무의 공간분포

Fig. 6은 분사압이 14.7MPa, 분위기압이 2.94 MPa, 분위기 온도가 300k인 비증발조건일 때의 분무의 분사 후 경과시간에 따른 분무형상을 나타낸 것이다. 분무가 충돌 후 반경 및 상부방향으로 시간이 경과함에 따라 넓게 퍼지면서 미립화되는, 충돌분무의 전형적인 분무 형상을 나타내고 있다. 연료의 분무가 연소실 내에 넓게 분포하기 때문에 연소특성에 좋은 영향을 미칠 것으로 사료된다.

Fig. 7은 분사압이 14.7MPa, 분위기압이 2.94 MPa, 분위기 온도가 600k인 증발조건에서의 노즐에서 분사된 후의 시간에 따른 분무의 형상을 나타낸 것이다. 증발이 분무의 가장자리에서 발생하여 넓게 분포하는 것은 충돌 후 주위 기상과의 열전달로 인하여 분무가 증발되었기 때문으로 생각된다.

Fig. 6과 Fig. 7에서 분무가 상부방향으로 치우쳐서 퍼지는 형상을 볼 수 있다. 이것은 충돌에 의해 상부방향으로 형성되는 강한 운동량의 영향

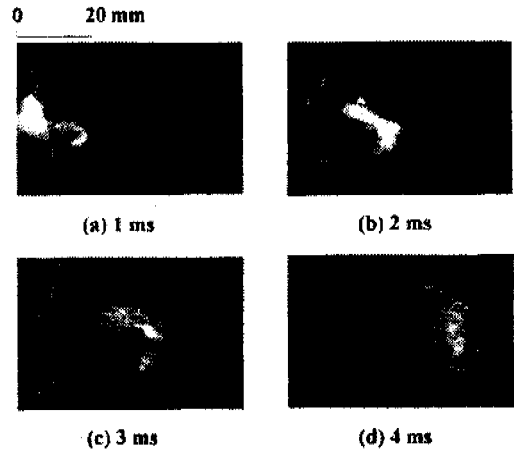


Fig. 6 Photographs for the non-evaporating spray process
 ($P_i=14.7\text{MPa}$, $P_g=2.94\text{MPa}$, $T_g=300\text{K}$)

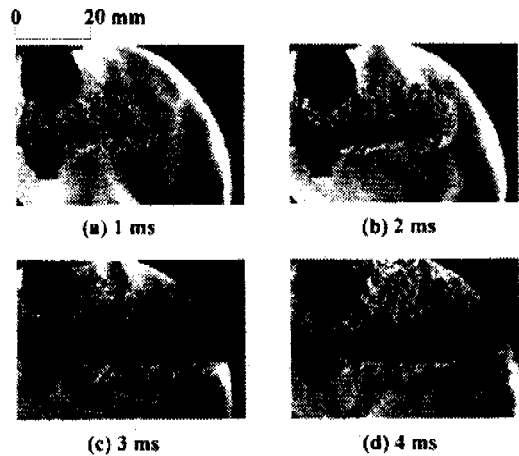


Fig. 7 Photographs for the evaporating spray process
 ($P_i=14.7\text{MPa}$, $P_g=2.94\text{MPa}$, $T_g=600\text{K}$)

도 있지만, Fig. 5의 대기압의 경우는 상부방향으로 치우치는 경향을 볼 수 없는 것으로 볼 때, 운동량의 영향보다는 분위기압의 영향이 큰 것으로 사료된다. 분위기압이 높으면 높을수록 분무는 반경방향으로 성장하지 못하고, 상부방향으로 퍼지는 공간분포를 나타낸다.

Fig. 8과 Fig. 9는 각각 Faeth모델에 의한 증발과 비증발조건에 대한 시간에 따른 분무형상을 액상과 기상을 연료중기질량분율(FVMF)로 나타

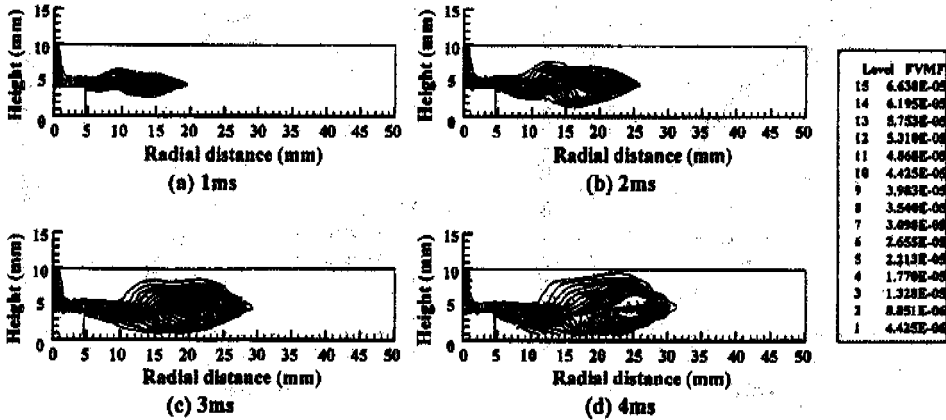


Fig. 8 Spray shapes for the non-evaporating spray ($P_i=14.7\text{MPa}$, $P_g=2.94\text{MPa}$, $T_g=300\text{K}$)

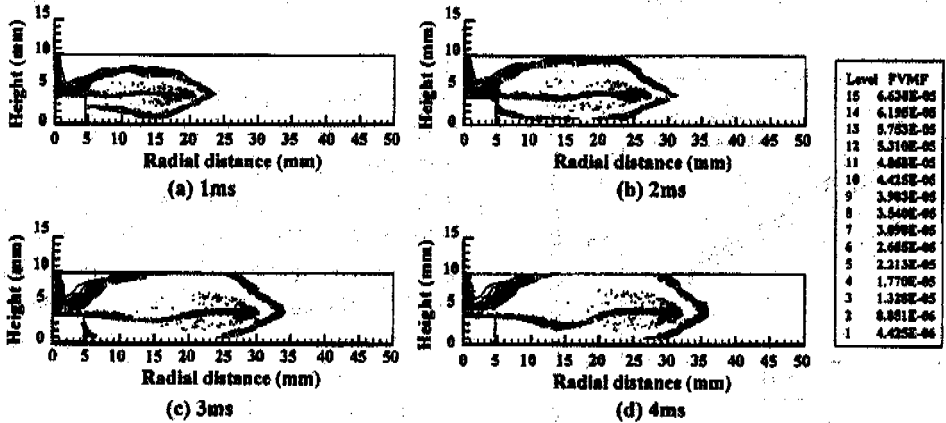


Fig. 9 Spray shapes for the evaporating spray ($P_i=14.7\text{MPa}$, $P_g=2.94\text{MPa}$, $T_g=600\text{K}$)

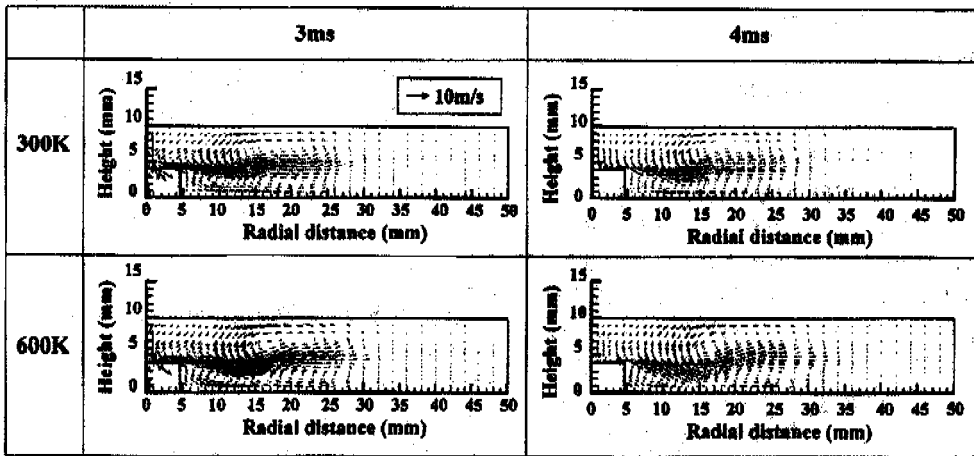


Fig. 10 Velocity vector shapes of the ambient gas ($P_i=14.7\text{MPa}$, $P_g=2.94\text{MPa}$)

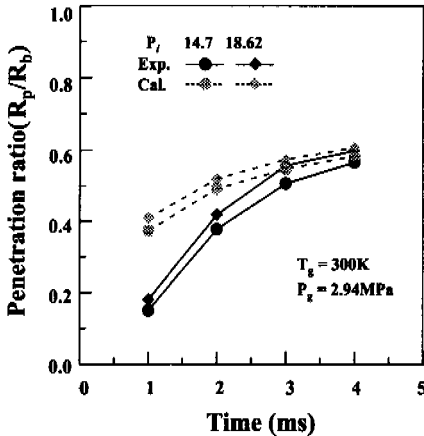


Fig. 11 Effects of injection pressure on penetration ratio

낸 것이다. Fig. 6과 Fig. 7의 실험결과와 비교할 때 전체적인 공간분포가 잘 일치하고 있다. 그러나, 충돌면 바로 위에서의 유동은 차이가 보인다. 이것은 현재 사용하고 있는 EPISO 알고리즘에선 Watkins & Park(14)에 의해 제시된 벽면충돌모델을 사용하고 있기 때문에, $We \geq 80$ 이상에서는 벽면제트로 유동하도록 되어 있다. 따라서, 충돌면에서 상부방향으로 되튀기는 운동량보다 벽면제트를 크게 고려하고 있기 때문으로 사료된다.

Fig. 10은 중발조건과 비중발조건에서의 분위기 기체의 속도 벡터를 나타낸 것이다. 분무선단과 외곽에 와가 형성되어 주위 공기와의 혼합을 유도하고 있음을 볼 수 있다. 중발조건에서 와가 크게 형성되어 양호한 공간분포 및 혼합기 형성을 유도하였다.

4.3 분무의 관통길이와 두께

Fig. 11은 분위기압이 2.94MPa일 때 분사압을 각각 14.7MPa, 18.62MPa로 하였을 때 관통길이를 계산과 실험결과를 비교한 것이다. 관통길이가 분사초기에는 시간의 경과에 따라 급격하게 증가하다가, 분사말기로 갈수록 증가하는 정도가 둔화하였다. 실험과 계산의 차이가 분사초기에 심하게 나타난다. 이것은 실제로 액적은 충돌 후 상방향으로 되튀기려는 운동량의 영향을 크게 받는 반면에, 계산의 경우 벽면제트의 운동량을 크게 계산하고 있기 때문이다.

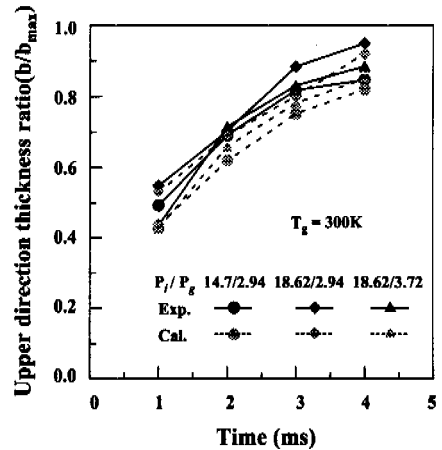


Fig. 12 Effects of injection pressure and ambient pressure on upper direction thickness ratio

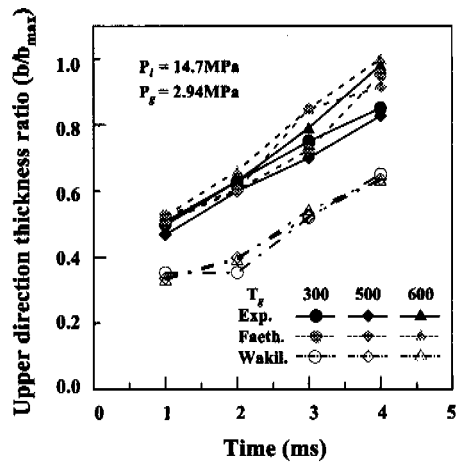


Fig. 13 Effects of ambient pressure on upper direction thickness ratio

Fig. 12는 비중발조건에서 분사압과 분위기압의 변화에 따른 상부방향 분무폭을 나타낸 것이다. 분사압과 분위기압의 증가에 따라 상부방향 분무폭은 증가하는 경향을 나타내고, 계산과 실험의 결과가 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 13은 상부방향 분무폭에 대한 분위기 온도의 영향을 나타낸 것이다. 상부방향 분무폭은 분위기 온도의 변화에 크게 영향을 받지 않음을 알 수 있고, 실험결과와 비교할 때 Wakil모델보다 Faeth모델의 계산결과가 잘 일치함을 알 수 있었다.

5. 결론

증발조건과 비증발조건에서의 증돌분무의 거동을 해석하기 위해 분사조건을 변화시킴에 따른 영향을 실험과 분무 EPISO 알고리즘을 사용한 수치해석을 수행하여 비교하였다.

(1) 분위기압의 영향으로 증돌분무의 공간분포가 증돌부 상방향으로 주로 분포하였다.

(2) 증돌분무는 분무의 가장자리에서 증발이 활발하게 일어나서, 전체적으로 넓게 분포하였다.

(3) 증발조건에서 분무외곽에 비증발조건에 비해 더 큰 와를 형성하여 양호한 공간분포 및 혼합기 형성을 유도하였다.

(4) 분무EPISO 알고리즘에 증돌판 위에서의 액막 생성에 따른 영향과 증돌 후 뒤뿔김과 벽면제트 형성에 관련되는 운동량에 대한 재고찰이 필요하다.

(5) 계산과 실험과의 차이는 주로 분부축 중심 근방에서 발생하였다. 증돌모델에서 초기에 벽면제트의 운동량을 크게 계산하고 있고, Wakil모델 보다는 Faeth모델이 실험과 잘 일치하였다.

참고문헌

- (1) Fujimoto, H., Takagishi, S., Senda, J., 1995, "Spray Characteristics of High-Pressure Diesel Spray," ILASS-Korea, pp. 126~131.
- (2) 차건종, 김덕줄, 1999, "증돌 분무의 내부구조와 미시적 거동에 관한 연구," 대한기계학회 논문집, 제23권, 제4호, pp. 470~478
- (3) Kato, S. and Onishi, S., 1990, "Newtype of Diesel Engine by Impinging of Fuel Jet (Oska-D)," SAE 9016
- (4) Issa, R. I., 1986, "Solution of the Implicitly Discretised Fluid Flow Equations by Operator Splitting," *J. Comp. Phys.*, 61(1), pp. 45~65.
- (5) Watkins, A. P., 1989, "Three-dimensional Modeling of Gas Flow and Sprays in Diesel Engines," In

N.C. Makatos, editor, *Computer Simulation of Fluid Flow, Heat and Mass Transfer and Combustion in Reciprocating Engines*, pp. 193~237, Hemisphere.

- (6) Wang, D. M., 1992, "Modeling Spray Wall Impaction and Combustion Processes of Diesel Engines," Ph.D.thesis, University of Manchester faculty of Technology.
- (7) K. Park, and D. M. Wang, and A. P. Watkins, 1993, "A Contribution to the Design of Novel Direct Injection Diesel Engine Combust System-Analysis of Pip Size," *Appl. Math Modeling*, Vol 17, pp. 114~124.
- (8) Park. K. and Watkins. A. P., 1996. "An Investigation of Combustion Chamber Shapes Small Automotive Direct Injection Diesel Engine Employing Spray Impaction," *IMEchE Journal of Automobile Engineering*, Vol 2, pp. 261~272.
- (9) 류성목, 차건종, 김덕줄, 박권하, 1998, '기연소실에서 새로운 증돌분무 형성에 대한 치적고찰,' 대한기계학회 논문집, 제22권 11호, pp. 1625~1634.
- (10) 김덕줄, 차건종, 서경일, 1996, "증돌원판 설치조건에 따른 디젤분무의 거동특성", 액체미립화학회 1996년도 학술강연회 논문집, pp. 92~98.
- (11) El-Wakil, Uyehara. O. A. , and Myers. P. S., 1954, "A Theoretical Investigation of Heating Up Period of Injected Fuel Droplet Vaporizing in Air," NASA TN_3179.
- (12) Faeth. G. M., 1983, "Evaporation And Combustion Of Sprays," *Prog. Energy Combust. Sci.* Vol. 9, pp. 1~76.
- (13) Faeth G. M., 1977, "Current Status of Droplet and Liquid Combustion," *Prog. Energy Combust. Sci.* Vol. 3, pp. 191~224.
- (14) Watkins, A. P. and Park, K., 1996, "Assesment and Application of a New Spray Wall Impaction Model," *Competers Reciprocating Engines and Gas Turbines, I.Mech.E.*, pp. 1~10.