

커먼레일식 디젤 인젝터의 충돌 분무에 대한 실험적 연구 (1) -거시적 분무 발달 과정-

An experimental study on the impingement spray of a
common-rail diesel injector (1) -macroscopic characteristics-

이 창 식*, 박 성 옥**, 서 상 현**

C. S. Lee, S. W. Park, S. H. Seo

ABSTRACT

In this paper, experimental study on the wall impingement spray of the common-rail diesel injector is performed. To examine the effect of various factors on the development of spray impinging on the wall, experiments were conducted at the various injection pressures, ambient pressures, wall distances from the injector tip, wall temperatures, and angles of wall inclination. The behaviors of the impingement spray are visualized by using laser sheet methods and a ICCD camera.

It is shown that the spray path penetration of the wall impingement spray increases with the increase of injection pressure, wall distance, wall temperature, wall angle. On the other hand the spray path penetration of the wall impingement spray decreases with the increase of ambient pressure.

주요기술용어(Key Words): Impingement spray (충돌 분무), Spray path penetration(분무 도달 거리), Common-rail injector (커먼레일식 인젝터)

기호설명	P_{inj} : injection pressure
A_w : angle of wall inclination	T_w : wall temperature
B_i : penetration coefficient of an impingement spray	t_w : impingement time
L_{path} : spray path penetration	ϕ : angle of wall inclination from perpendicular line
L_x : axial spray penetratioin	
L_y : radial spray penetration	
L_w : wall distance from the injector	
P_{amb} : ambient pressure	

1. 서 론

최근 환경오염 규제가 엄격해지면서 자동차 엔진의 유해 배출 가스의 저감에 대한 연구가 여러 연구자에 의하여 다양하게 진행되고 있

* 한양대학교 기계공학부

** 한양대학교 대학원

다. 특히 디젤 엔진 내에서 충돌 분무시의 액막 형성은 혼합기 형성에 영향을 미치며, 저온 시동시 발생하는 미연탄화수소는 대기오염에 주된 요인의 하나가 되고 있다. 따라서, 기관의 출력 성능과 배기 특성에 영향을 미치는 충돌 분무 거동 특성을 알아보는 것은 매우 중요하다.

이처럼 배출물 규제와 연비를 개선할 수 있는 엔진 시스템으로 커먼레일식 직접 분사 디젤 엔진이 개발되었다. 커먼레일식 엔진은 전자제어를 통하여 정확한 연료량과 시기를 조절하여 100MPa이상의 고압으로 연소실 내부로 직접 분사하는 방식이다. 고속 디젤 엔진에서 고압분사시 피스톤 벽면에 충돌후 공기 혼합과정에서 엔진성능에 크게 영향을 미친다. 또한 충돌시 액적의 2차 미립화가 발생하여 중발 및 연소를 촉진시키기 때문에 충돌 분무를 적용하여 연소 효율 및 배기 가스 저감을 위한 연구가 실험 및 수치적으로 진행되고 있다.

Katsura 등⁽¹⁾은 평판에 충돌하는 디젤 분무의 특성을 실험적으로 연구하였고, Stanton과 Rutland⁽²⁾는 디젤 엔진내 액막형성과 벽의 상호작용을 수치적으로 연구하였으며, Guerrassi 등⁽³⁾과 Ebara 등⁽⁴⁾은 실험과 수치를 동시에 수행하였다. 또한, 박 등⁽⁵⁾과 안 등⁽⁶⁾은 경사 충돌 분무를 실험적으로 연구하였고, Ko와 Arai^{(7), (8)}는 충돌 분무와 자유 분무를 실험적으로 비교하였다. 하지만 고압으로 분사되는 커먼레일식 디젤 인젝터의 충돌 분무 현상은 아직까지 확실하게 규명되지 않고 있으며, 이에 관한 충분한 데이터를 확보하지 못하고 있다.

따라서 본 연구에서는 커먼레일식 디젤 인젝터에서 분사되는 분무 액적들의 벽면에 충돌하는 거시적 특성을 분사 압력, 분위기 압력, 벽면 충돌 거리, 벽면 온도, 벽면 각도를 변화시켜 실험적으로 살펴보고 Ebara 등⁽⁴⁾이 제안한 경험식과 비교하였다.

식 디젤 엔진의 충돌 분무를 거시적으로 분석하기 위해서 연료 분사 장치, 고압 체임버, 가시화 장치로 구성하였다. Fig.1은 본 실험에서 사용된 실험 장치 개략도이다.

연료 분사 장치는 최고 200MPa 고압으로 압축이 가능한 고압 연료 펌프를 사용하여 커먼레일에 균일한 압력으로 유지하여 인젝터에 공급되어지게 하였다. 또한, 실험에 사용된 커먼레일식 디젤 인젝터는 개변압이 12MPa이고 최고 160MPa까지 고압 분사가 가능하며 직경이 0.3mm, 리프트가 0.8mm, L/D가 2.67인 단공 핀틀형 노즐을 사용하였다. 인젝터의 구조와 노즐의 개략도는 Fig.2와 같다. 충돌판은 30, 50, 70mm로 높이 조절은 물론 0°, 30°, 45° 각도 조절이 가능한 직경 125mm인 원형으로 가열판과 열전대를 삽입하여 온도 조절과 측정이 가능하도록 하였다.

고압 체임버는 분위기 압력 4MPa이상까지 견딜 수 있는 크기가 467×443×363mm이고 가시화장을 설치하여 촬영이 가능하도록 Fig.3과 같이 제작하였다.

분무 특성을 촬영하기 위한 가시화 장치는 ICCD를 사용하여 디젤 분무의 형상을 획득하였다. 가시화 촬영을 위한 광원은 Ar-ion 레이저를 사용하였고 광학시스템으로부터 형성된 레이저 시트빔으로 이용하여 영상을 획득하였다.

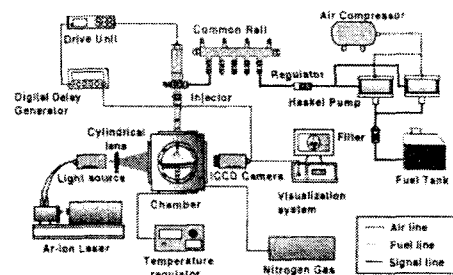


Fig.1 Schematic diagram of the experimental apparatus

2. 실험 장치 및 방법

2.1 실험장치

본 연구에서 사용된 실험 장치는 커먼레일

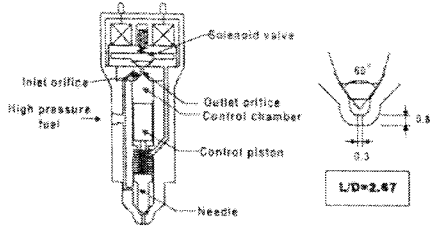


Fig.2 High pressure diesel injector and nozzle tip

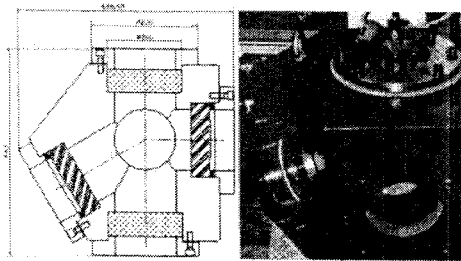


Fig.3 High pressure chamber

2.2 실험방법

본 실험에서는 인젝터의 분사 압력, 체임버 내의 분위기 압력, 벽면 충돌 거리, 충돌 벽면 온도, 충돌 벽면 각도를 변화시킨 Table 1과 같은 실험 조건으로 충돌 분무의 거시적 특성을 살펴보았다.

인젝터와 ICCD를 동기화시키기 위해서 신호발생기를 사용하여 제어하였다. 체임버 내의 압력 조절은 질소가스를 사용하였고, 인젝터 분사압력 조절은 커먼레일의 압력 조절로 조절하였다. 가열판의 온도 조절은 열전대와 온도 조절기를 사용하여 조절하였다. 인젝터의 분사 시간은 1ms로 유지하였으며, 분사압력은 80, 100, 120MPa, 분위기 압력은 0.1, 2, 4MPa, 충돌거리는 30, 50, 70mm, 충돌 벽면 온도는 300, 450, 600K, 충돌 각도는 0, 30, 45°로 변화시켜 다양한 조건하에 실험을 수행하였다.

Table 1. Experimental conditions

Nozzle diameter	0.3 mm
L/D	2.67
Wall distance	30, 50, 70mm
Wall temperature	300, 450, 600 K
Injection pressure	80, 100, 120 MPa
Ambient pressure	0.1, 2, 4 MPa
Angle of wall inclination	0, 30, 45°

2.3 분무 도달 거리의 측정 방법

2.3.1 실험 결과에 의한 분무 도달 거리

본 연구에서는 평판에서의 충돌 분무와 경사충돌 분무의 분무 도달 거리를 측정하였다. 평판에서의 충돌 분무 도달 거리는 Ko 등^{(7), (8)}이 제안한 L_{path} 를 사용하였고, 경사 충돌 분무 도달 거리는 Ebara 등⁽⁴⁾이 제안한 L_{path} 를 사용하였다. L_{path} 는 스칼라 양으로써 축방향거리 L_x 와 반경 방향 거리 L_y 로 정의된다. Fig.4는 평판 충돌 분무의 분무 도달 거리를 나타낸 것이고, Fig.5는 경사 충돌 분무 도달 거리를 나타낸 것이다.

$$dL_{path} = \sqrt{(dL_x)^2 + (dL_y)^2} \tag{1}$$

$$L_{path} = \int_0^t \sqrt{\left(\frac{dL_x}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dL_y}{dt}\right)^2} dt \tag{2}$$

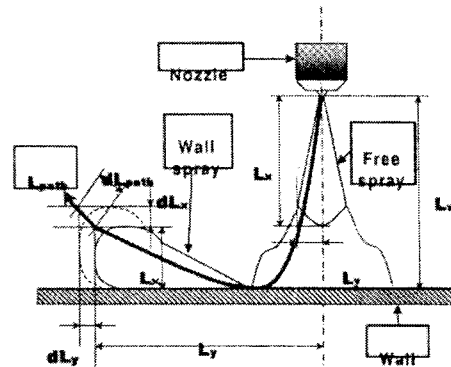


Fig.4 Definition of the impingement spray path penetration

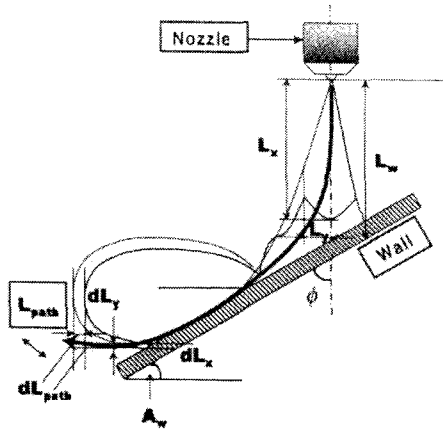


Fig.5 Definition of the inclined impingement spray path penetration

2.3.2 경험식에 의한 분무 도달 거리

본 연구에서는 충돌 분무에 관한 실험 결과들과 비교하기 위해 Ebara 등⁽⁴⁾이 제안한 경험식을 사용하여 분무 도달 거리 L_{path} 를 실험을 토대로 얻어진 결과를 구한 실험 결과와 비교하였다. 이 경험식은 충돌후의 분무 도달 거리를 나타낸 것이다. 경험식에 의한 L_{path} 는 충돌 분무 상수 B_1 를 이용하여 구할 수 있으며, 충돌 분무 상수 B_1 는 충돌거리, 경사 각도, 분위기 압력에 의해 다음과 같이 정의되어진다.

$$L_{path} = B_1 \sqrt{L_w - L_w} + L_w \tag{3}$$

$$B_1 = (56.1 - 0.36 L_w - 0.39 \phi + 0.0033 L_w \phi) \times \left(\frac{1.5}{P_{atm}} \right)^{1/4} \tag{4}$$

3. 실험 결과 및 분석

3.1 충돌 분무의 발달 과정

Fig.6은 자유분무, 분사압력, 분위기 압력, 충돌 거리, 벽면 온도, 벽면 각도에 따른 다양한 충돌 분무 조건하에서의 발달 과정을 나타낸 것이다.

Fig.6 (a)는 자유분무와 충돌 분무 발달 거동을 비교한 것이다. 충돌거리 변화에 따른 충돌

분무는 벽면 거리가 짧을수록 빨리 충돌하여 30mm일 경우 반경방향의 분무 도달 거리는 70mm의 경우보다 반경방향의 도달거리가 길게 나타났다.

Fig.6 (b)는 분사 압력이 도달 거리에 미치는 영향을 비교한 것이다. 분사 압력이 증가함에 따라 분사 속도도 증가하여 벽면까지의 도달시간이 감소하게 되어 120MPa의 경우가 80MPa의 반경방향 거리에 비해 약간 증가되었음을 알 수 있다. 그러나 Fig.6 (c)의 경우 분위기 압력이 증가할수록 분무의 발달이 현저하게 둔화되어 벽면에 늦게 충돌하는 것을 알 수 있었으며, 충돌후에도 반경방향의 거리가 현저하게 작게 나타나는 것을 볼 수 있었다. 이것으로 분사 압력보다는 분위기 압력에 대한 영향이 분무 도달 거리에 더 큰 영향을 미치는 것을 보여준다.

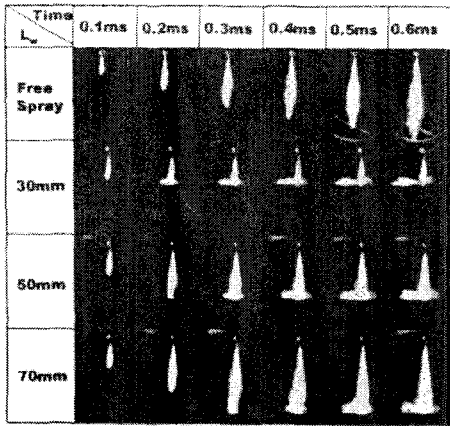
그리고 Fig.6 (d)는 (a)의 경우보다 분위기 압력과 벽면 온도의 증가된 조건하에서의 벽면 거리에 따른 충돌 분무의 결과를 보여주고 있다. 벽면 거리의 증가에 따라 충돌 후 반경 방향 거리의 차이가 나타나는 것을 볼 수 있다. Fig.6 (e)의 경우는 벽면 온도의 변화에 따른 충돌 분무 결과를 보여주고 있는데 벽면 온도의 상승의 영향으로 충돌후 액적의 점성력이 감소하여 온도가 가장 높은 600K의 경우가 300K보다 반경 방향 거리가 다소증가함을 볼 수 있다.

Fig.6 (f)는 충돌 벽면 각도에 따른 충돌 분무의 그림을 보여주고 있다. 벽면 각도가 작아질수록 충돌후 분무 형태는 중앙 아래쪽 부분과 위쪽 부분의 반경 방향의 거리가 상당한 차이가 나고 있음을 알 수 있다. 45°의 경우가 30°보다 아래쪽 부분의 반경방향이 보다 빨리 성장하나 위쪽 반경 방향은 감소하는 현상을 관찰할 수 있었다.

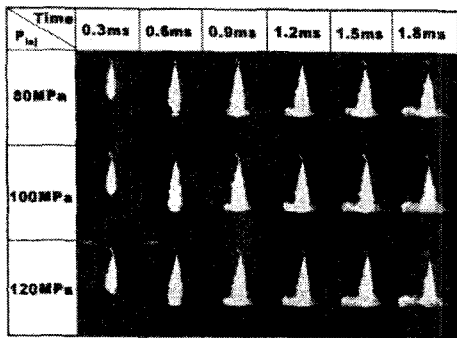
3.2 충돌 분무 도달 거리의 비교

3.2.1 자유분무와 충돌분무의 비교

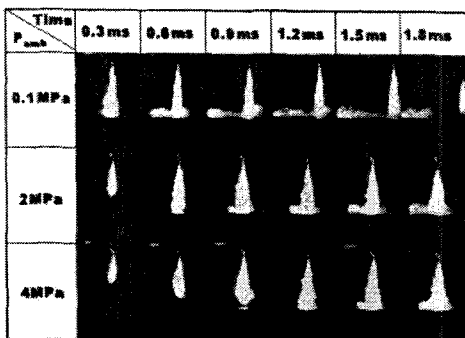
Fig.7은 실험 결과의 분무 형상을 이용하여 L_{path} 를 나타낸 것이다. 전체적으로 초기에는 분무 도달 거리 L_{path} 가 비슷하지만 충돌후에는



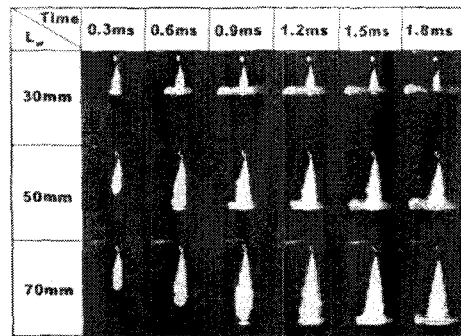
(a) $P_{inj}=100\text{MPa}$, $P_{amb}=0.1\text{MPa}$, $T_w=300\text{K}$, $A_w=0^\circ$



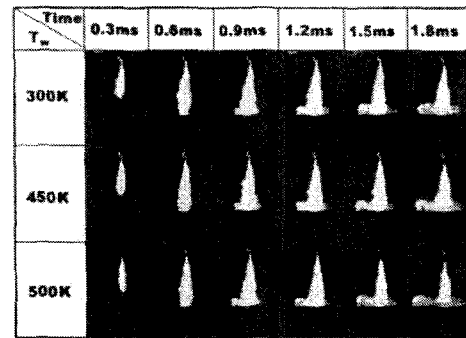
(b) $P_{amb}=2\text{MPa}$, $L_w=50\text{mm}$, $T_w=450\text{K}$, $A_w=0^\circ$



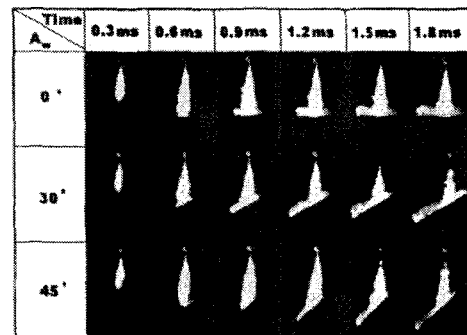
(c) $P_{inj}=100\text{MPa}$, $L_w=50\text{mm}$, $T_w=450\text{K}$, $A_w=0^\circ$



(d) $P_{inj}=100\text{MPa}$, $P_{amb}=2\text{MPa}$, $T_w=450\text{K}$, $A_w=0^\circ$



(e) $P_{inj}=100\text{MPa}$, $P_{amb}=2\text{MPa}$, $L_w=50\text{mm}$, $A_w=0^\circ$



(f) $P_{inj}=100\text{MPa}$, $P_{amb}=2\text{MPa}$, $T_w=450\text{K}$, $L_w=50\text{mm}$

Fig.6 Visualization of the impingement spray development

자유분무가 L_{amb} 가 가장 크며 충돌 거리가 짧아질수록 분무 도달 거리 L_{path} 가 감소하였다. 이는 L_{amb} 식의 L_a 값이 충돌후에 급격히 감소하기 때문에 충돌거리가 가장 짧은 30mm의 경우가 가장 작은 값을 보여주게 된다.

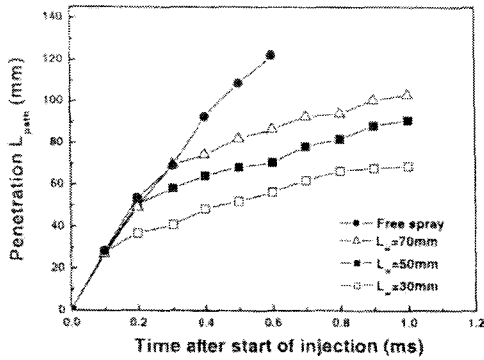


Fig.7 Comparison of the spray path penetration of free spray and wall impingement sprays ($P_{inj}=100MPa$, $P_{amb}=0.1MPa$, $T_w=300K$, $A_w=0^\circ$)

3.2.2 분사 압력에 따른 분무 도달 거리 비교

충돌 분무의 특성에 미치는 분사압력의 영향을 알아보기 위하여 분사압력을 80, 100, 120MPa로 변화시키면서 실험하였으며, Fig.8은 분사 압력에 따른 분무 도달 거리 L_{path} 를 나타낸 것이다. 분사 압력이 증가할수록 초기에는 비슷하지만 시간이 경과할수록 L_{path} 가 약간 증가하는 경향을 나타내었다.

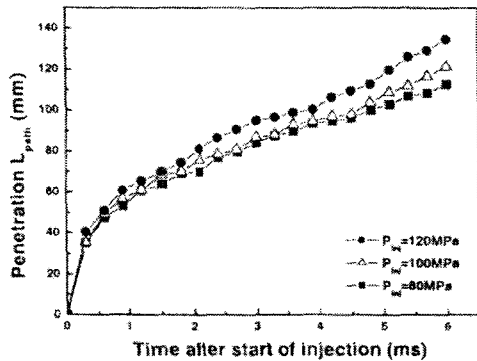


Fig.8 Spray path penetration according to the injection pressure ($P_{amb}=2MPa$, $L_w=50mm$, $T_w=450K$, $A_w=0^\circ$)

3.2.3 분위기 압력에 따른 분무 도달 거리 비교

충돌 분무의 특성에 미치는 분위기 압력의 영향을 나타낸 Fig.9는 분위기 압력을 0.1, 2, 4MPa의 조건하의 분무 도달 거리 L_{path} 를 나타낸 것이다. 분위기 압력이 증가할수록 분무의 성장을 지연시켜 반경방향의 증가가 둔화되어 분무 도달 거리 L_{path} 가 현저하게 감소하는 경향을 보여주었으며 이는 분사압력의 영향보다 훨씬 큰 차이를 보여주고 있음을 알 수 있다.

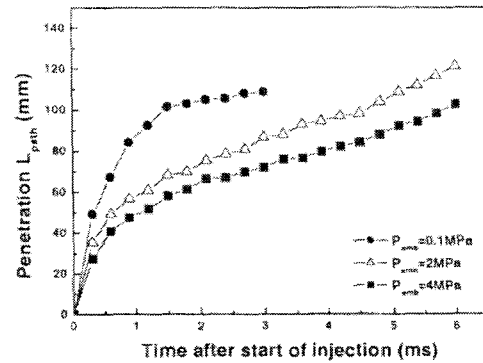


Fig.9 Spray path penetration according to the ambient pressure ($P_{inj}=100MPa$, $L_w=50mm$, $T_w=450K$, $A_w=0^\circ$)

3.2.4 벽면 거리에 따른 분무 도달 거리 비교

30, 50, 70mm로 벽면 거리를 변화시켜 분무 도달 거리 L_{path} 의 결과를 Fig.10에 나타내었다. 벽면 거리가 증가할수록 충돌이 지연되어 분무 도달 거리 L_{path} 가 증가하였으며 충돌 후 L_{path} 의 증가 경향은 모두 비슷하게 나타났다.

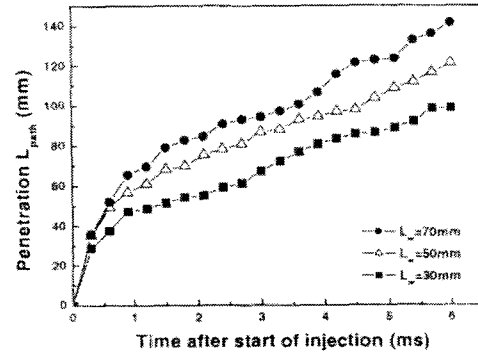


Fig.10 Spray path penetration according to the wall distance ($P_{inj}=100MPa$, $P_{amb}=2MPa$, $T_w=450K$, $A_w=0^\circ$)

3.2.5 벽면 온도에 따른 분무 도달 거리 비교

충돌 분무의 특성에 미치는 벽면 온도의 영향을 알아보기 위하여 벽면 온도를 300, 450, 600K로 변화시키면서 실험하였다. Fig.11은 벽면 온도에 따른 분무 도달 거리 L_{path} 를 나타낸 것이다. 벽면 온도가 증가할수록 분무 도달 거리 L_{path} 가 약간 증가하는 경향을 보였다. 이는 고온 벽면에 충돌시 분무 액적의 점성력이 감소하여 분무가 반경방향으로 활발하게 진행되는 것으로 판단된다.

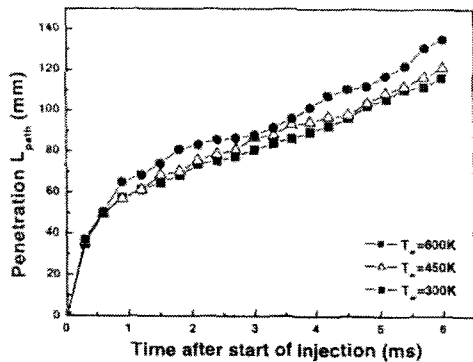


Fig.11 Spray path penetration according to the wall temperature ($P_{inj}=100\text{MPa}$, $P_{amb}=2\text{MPa}$, $L_w=50\text{mm}$, $A_w=0^\circ$)

3.2.6 경사 각도에 따른 분무 도달 거리 비교

Fig.12는 경사 각도 0, 30, 45°에 따른 분무 도달 거리 L_{path} 를 나타낸 것이다. 경사 각도가 증가할수록 분무 도달 거리 L_{path} 가 감소하는 경향을 보였다. 이는 경사 각도가 증가할수록 분무 액적의 운동량이 감소하여 반경방향으로의 분무 성장이 느리게 진행된 것으로 판단된다.

3.3 경험식에 의한 분무 도달 거리 비교

3.3.1 분위기 압력에 따른 분무 도달 거리 비교

분위기 압력을 0.1, 4MPa로 변화시키면서 실험한 결과와 Ebara 등⁽⁴⁾이 제안한 경험식을 이용하여 분무 도달 거리 L_{path} 를 예측하였다. Fig.13은 실험 결과와 경험식 예측 결과를 비교하여 나타낸 것이다. 경험식에 의한 충돌후의 예측 결과값이 전체적으로 실험 결과와 비

교차 잘 일치하였다.

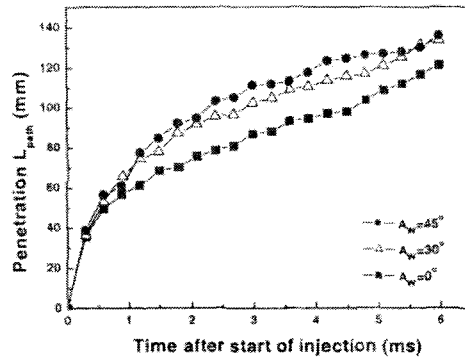


Fig.12 Spray path penetration according to the angle of wall inclination ($P_{inj}=100\text{MPa}$, $P_{amb}=2\text{MPa}$, $T_w=450\text{K}$, $L_w=50\text{mm}$)

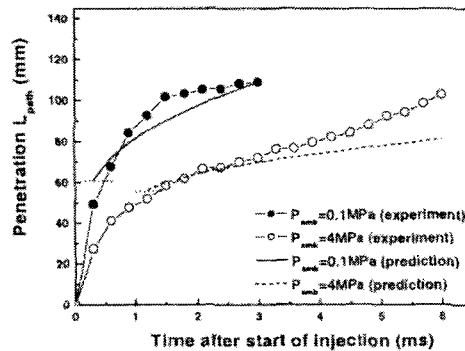


Fig.13 Comparison of the spray path penetration of the experimental result and the prediction by empirical equation according to the ambient pressure ($P_{inj}=100\text{MPa}$, $L_w=50\text{mm}$, $T_w=450\text{K}$, $A_w=0^\circ$)

3.3.2 벽면 거리에 따른 분무 도달 거리 비교

Fig.14는 벽면 거리 30, 70mm일때의 실험결과와 경험식 예측 결과값과의 비교를 보여주고 있다. 경험식에 의한 충돌후의 예측 결과가 충돌 직후 초기에서는 잘 일치하였으나, 시간이 경과함에 따라서 실험 결과보다 분무 도달 거리 L_{path} 를 짧게 예측하였다. 이는 Ebara 등⁽⁴⁾이 제안한 경험식은 본 실험보다는 낮은 분사 압력에서 수행되어 고압의 커먼레일 디젤 엔진 터에서는 잘 맞지 않는 것으로 생각된다.

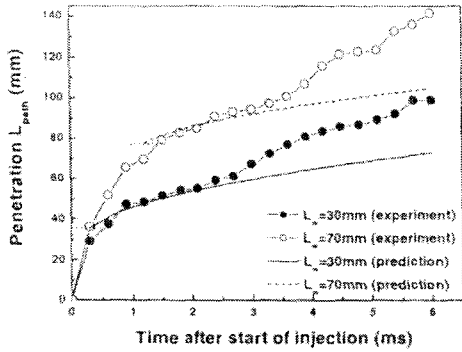


Fig.14 Comparison of the spray path penetration of the experimental result and the prediction by empirical equation according to the wall distance ($P_{inj}=100\text{MPa}$, $P_{amb}=2\text{MPa}$, $T_w=450\text{K}$, $A_w=0^\circ$)

3.3.3 경사 각도에 따른 분무 도달 거리 비교

경사 각도를 $0, 45^\circ$ 로 변화시키면서 실험한 결과와 Ebara 등⁽⁴⁾이 제안한 경험식을 이용하여 분무 도달 거리 L_{path} 를 예측하였다. Fig.15는 실험 결과와 경험식 예측 결과를 비교하여 나타낸 것이다. 경험식에 의한 충돌후의 예측 결과가 충돌 지점시작은 일치하였으나, 전체적으로 실험 결과와 분무 도달 거리 L_{path} 가 경향은 비슷하게 보여주나 값의 차이는 현저하게 나타난 것을 볼 수 있었다.

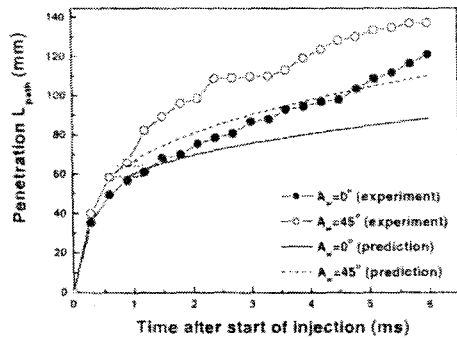


Fig.15 Comparison of the spray path penetration of the experimental result and the prediction by empirical equation according to the angle of wall inclination ($P_{inj}=100\text{MPa}$, $P_{amb}=2\text{MPa}$, $T_w=450\text{K}$, $L_w=50\text{mm}$)

4. 결 론

커먼레일식 디젤 인젝터의 거시적 분무특성을 분사 압력, 분위기 압력, 충돌 거리, 벽면 온도, 경사 각도를 변화시켜 실험한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 분무 도달 거리 L_{path} 는 자유 분무의 L_{path} 가 가장 크고 벽면 거리가 증가할수록 L_{path} 가 증가하였다.

(2) 분사 압력이 증가할수록 분무 초기에는 영향이 적었지만 시간이 경과함에 따라 분무 도달 거리 L_{path} 가 증가하였다.

(3) 분위기 압력이 증가할수록 대기압에 비해 분무 도달 거리 L_{path} 가 급격히 감소하는 경향을 나타내었다.

(4) 충돌 거리가 증가할수록 충돌시 충돌 에너지의 증가로 인해 분무 도달 거리 L_{path} 가 증가하는 경향을 보였다.

(5) 벽면 온도의 증가에 따라서 충돌시 액적의 점성력이 감소하여 반경방향의 활발한 분무 성장으로 인해 분무 도달 거리 L_{path} 가 증가하였다.

(6) 실험 결과와 경험식에 의한 예측치를 비교한 결과, 분위기 압력에 따른 예측치는 실험값에 근접하는 좋은 결과를 얻었지만 충돌 거리에 따른 예측치는 충돌 초기에만 일치하였고, 경사 각도에 의한 예측치는 현저한 차이나는 것을 알 수 있었다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 목적 기초 연구 사업 (R-01-2000-000303-0 (2002))의 연구지원에 의하여 수행되었으며, 연구를 지원해주신 관계 기관에 감사 드립니다.

참고문헌

(1) N. Katsura, M. Saito, J. Senda, H.Fujimoto, "Characteristics of a Diesel Spray Impinging on a Flat wall", SAE

- paper 890264, 1989
- (2) D. Stanton and C. Rutland, " Modeling Fuel Film Formation and Wall Interaction in Diesel Engines", SAE paper 960628, 1996
- (3) N. Guerrassi and J. Champoussin, "Experimental Study and Modeling of Diesel Spray/Wall Impingement", SAE paper 960864, 1996
- (4) T. Ebara, K. Amagai, M. Arai, "Movement and Structure of Diesel Spray Impinging on an Inclined Wall", SAE paper 970046, 1997
- (5) 박대순, 김문헌, 박권하, "주위 압력 및 충돌면 위치 변화가 디젤 분무에 미치는 영향", 한국자동차공학회논문집, 제5권, 제 3호, pp.95-105, 1997
- (6) 안병규, 류호성, 오은탁, 송규근, 정재연, "고온고압용기에서 충돌분무 특성에 관한 실험적 연구", 한국자동차공학회논문집, 제10권, 제 3호, pp36-43, 2002
- (7) K.N. Ko, M. Arai, "The Characteristics of Post-impingement Diesel Spray, Part I: Penetration and Volume", Atomization and Sprays, Vol.12, pp.403-417, 2002
- (8) K.N. Ko, M. Arai, "The Characteristics of Post-impingement Diesel Spray, Part II : Empirical Equation of Penetration", Atomization and Sprays, Vol.12, pp.419-430, 2002