

## 고온고압용기에서 충돌분무 특성에 관한 실험적 연구

### An Experimental Studies on Impingement Spray Characteristic in High Temperature and Pressure Chamber

안 병 규\*, 류 호 성\*, 오 은 탁\*, 송 규 근\*\*, 정 재 연\*\*\*  
Byoungkyu Ahn, Hosung Ryu, Euntak Oh, Kyukeun Song, Jaeyoun Jung

#### ABSTRACT

The characteristics of spray has much effect on performance and emissions for automobile, diesel engine, gas turbine and combustion engines. So spray behavior after impinging the wall is very important for prediction the engine performance. This studies examined about impingement spray considering ambient density(18,24,30  $kg/m^3$ ), temperature(293,473K), impingement angle(0,30,45°). The images of impingement spray were obtained by the high speed video camera. After that we analyzed impingement spray characteristics to use this images.

In this experiment, we found that 1) The spray width is reduced by increasing the ambient gas density and temperature, 2) The growth of downstream is increased by increasing the impingement angle.

주요기술용어 : Impingement spray(충돌분무), Impingement angle(충돌각), Ambient density(분위기밀도), Ambient temperature(분위기밀도)

#### Nomenclature

- $r_{w1}$  : spray radius in downstream, *cm*
- $r_{w2}$  : spray radius in upstream, *cm*
- $h_{w1}$  : spray height in downstream, *cm*
- $h_{w2}$  : spray height in upstream, *cm*
- $T_a$  : ambient temperature, *K*

#### 1. 서론

최근 대기 환경오염에 대한 문제가 대두되면서 배기가스에 대한 법적 규제가 강화되어가고

있으며 배기 오염원 중에서, 특히 디젤기관이 많은 비중을 차지하고 있다. 디젤기관은 공기를 압축한 후 여기에 연료를 분사시켜 혼합기를 형성, 연소한다. 그래서 연료분사는 기관의 출력성능 및 배기 특성에 크게 영향을 미치기 때문에 배기가스 규제 만족 및 기관 성능 향상을 위해서 연료 분사 과정 및 연소과정 개선은 매우 중요하다. 이런 조건을 만족시키기 위한 방법으로 고압분사 등이 있다. 소형엔진에서는 고압분사가 이루어질 때 벽면충돌이 일어나며, 피스톤 벽면에 충돌한 후 공기와의 혼합과정이 엔진성능에 크게 영향을 미친다.

충돌시 액적의 2차 미립화 현상이 일어나 분무액적의 표면적을 증가시켜 증발 및 연소를 촉진

---

\* 회원, 전북대학교 대학원  
\*\* 회원, 전북대학교 자동차신기술연구센터  
\*\*\* 회원, 전북대학교 공업기술연구소

진시킴에 때문에 이러한 특성을 가지는 충돌분무를 적용하여 연소효율 및 배기가스 저감을 위한 연구가 진행되고 있다.<sup>1,2)</sup> 또한 충돌분무에 대한 연료중발 농도와 연료 액적의 수밀도에 관한 연구와 최근 들어 모델링을 기초로 하여 수치해석연구가 진행되고 있다.<sup>3-5)</sup> 또한, 정적용기 내부에서의 분무형상 및 평판에 충돌하는 디젤분무의 해석 연구도 있다.<sup>6,7)</sup>

지금까지의 충돌분무에 관한 국내에서의 실험적 연구는 상온·상압 혹은 상온·고압 하에서 주로 수행이 되었고, 고온·고압 하에서의 충돌분무에 대한 연구는 부족하다. 따라서 본 연구에서는 상온·상압에서부터 고온·고압에 걸친 다양한 조건하에서 비정상 디젤 충돌분무의 거동을 고속비디오카메라로 가시화 하였으며, 이를 바탕으로 충돌분무에서의 충돌폭 분무 높이 등을 측정·해석하였다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 실험장치 구성

본 연구에서 사용한 실험장치는 디젤기관의 자유분무를 관찰, 촬영, 해석할 수 있도록 연료 분사장치, 고온고압용기, 가시화 시스템으로 구성하였다. Fig. 1은 본 실험에서 사용된 실험장치의 개략도이다.

실험에서는 노즐 직경이 1.02mm, 리프트가 0.45mm인 상용되고 있는 단공 핀틀형 노즐을 사용하였다. 노즐의 분사압력은 14MPa로 고정시켜 실험을 수행하였다. 연료 분사펌프는 회전수 조절 컨트롤러가 부착된 직류전동기를 사용하여 구동, 분사펌프의 회전수를 조절하였다. 또한 1회 분사장치는 분사펌프와 D.C 모터 사이에 장착한 포토센서에 의해 상사점을 검출, 단발분사 신호를 획득하여 1회 분사만을 시키면서 해석하였다. 충돌판은 열전도가 잘 되는 직경 140mm의 황동 원형으로 설계·제작하여 사용하였다.

고온고압 용기는 최고온도 673K, 최고압력 15MPa까지 조절할 수 있도록 설계하였으며, 3면에

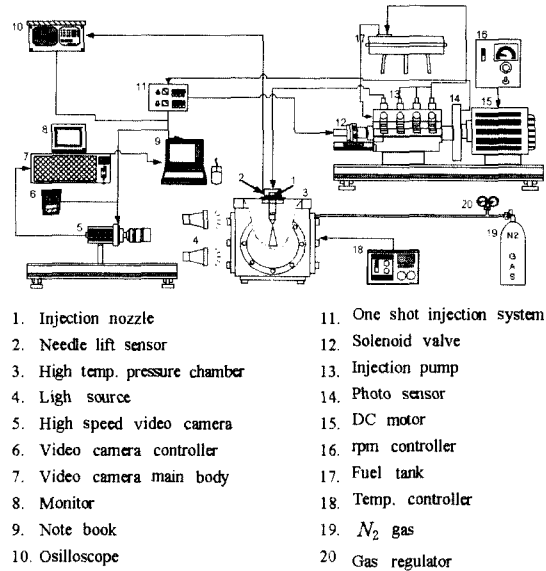


Fig. 1 Schematic diagram of experimental system

직경 160mm의 석영창을 설치하여 관찰 및 사진 촬영을 할 수 있도록 제작하였다.

분무 특성을 밝히기 위한 가시화 장치는 고속 비디오 카메라(FASTCAM ultima40K)를 사용하여 디젤분무의 영상을 9000fps로 획득하였다. 얻어진 영상은 컴퓨터로 전송하여 이미지 데이터를 처리 해석하였다. 가시화 촬영을 위한 광원은 연속광인 할로젠 1KW 2개를 사용하였다.

### 2.2 실험방법

본 실험에서는 실제 엔진 조건에 근사하기 위해 고압용기를 제작하여 실험을 하였다. 실험에 있어서는 분사압력을 14MPa, 분사펌프의 회전수를 700rpm으로 설정하였고, 분위기 밀도를 각각 18, 24, 30kg/m<sup>3</sup>, 분위기 온도를 각각 293, 473 K, 또한 충돌판의 각도를 0, 30, 45°로 변화시켜가면서 실험을 수행하였다.

실험의 각 조건들은 Table 1에 보인다. Fig. 2는 충돌분무의 형상을 나타내고 있다. 수평선과 충돌판이 이루는 각을 충돌각( $\alpha$ )으로 정의하였으며, 하류방향의 분무반쪽은  $r_{ul}$ , 하류방향 분무 상승두께는  $h_{ul}$ , 상류방향의 분무반쪽은  $r_{ul2}$ , 상

Table 1 Test conditions

Density	18kg/m <sup>3</sup>	24kg/m <sup>3</sup>	30kg/m <sup>3</sup>
Temperature	0, 30, 45°	0, 30, 45°	0, 30, 45°
293K	0, 30, 45°	0, 30, 45°	0, 30, 45°
473K	0, 30, 45°	0, 30, 45°	0, 30, 45°

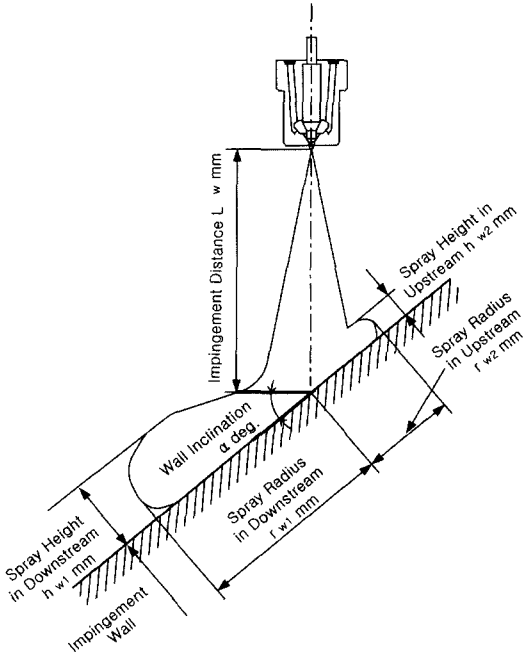


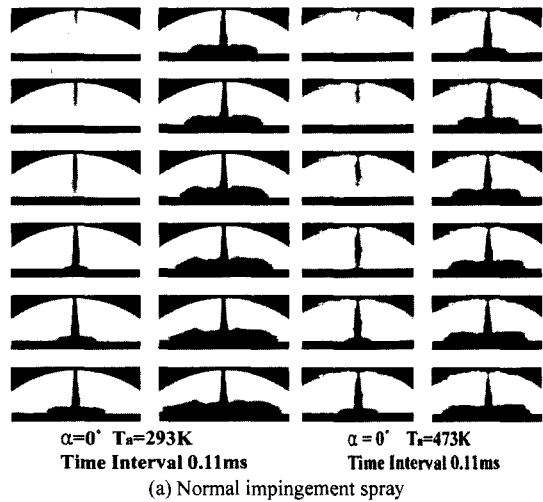
Fig. 2 Schematic of the impinging spray

류방향의 분무 상승두께는  $h_{w2}$ 라 정의하였다. 실험에 있어 분무팁에서 충돌판까지의 거리는  $L_w = 30\text{mm}$ 로 설정하였다.

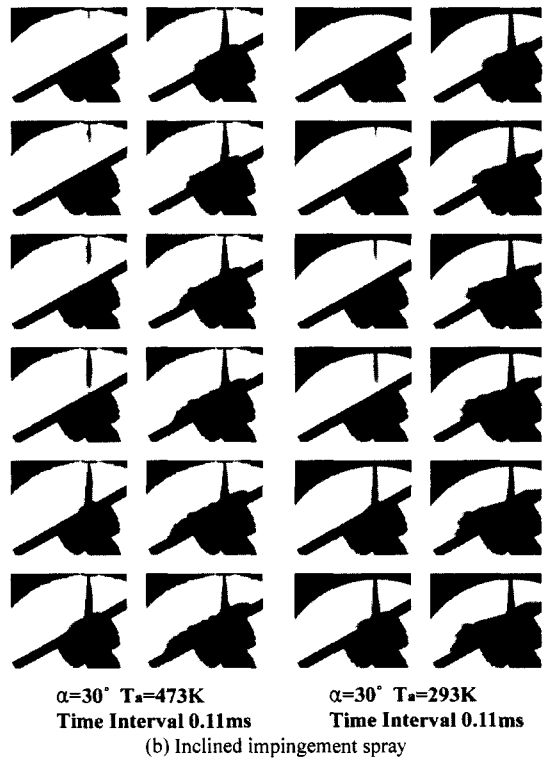
### 3. 실험결과 및 분석

#### 3.1 충돌분무구조

디젤기관에서 연료의 자유분무 및 충돌 후 분무 상태는 엔진내의 혼합기 형성과정 및 엔진성능에 크게 영향을 미치는 중요한 인자이기 때문에 이에 대한 명확한 해석은 매우 중요하다. 이를 파악하기 위해 충돌분무의 분무형상을 촬영하여 하류방향 분무반폭( $r_{w1}$ ), 상류방향 분무반폭( $r_{w2}$ ), 하류방향 분무상승두께( $h_{w1}$ )와 상류방향



(a) Normal impingement spray



(b) Inclined impingement spray

Fig. 3 Photographs of impingement spray

분무상승두께( $h_{w2}$ ) 등을 해석하였다.

Fig. 3(a)는 분무가 충돌판에  $\alpha=0^\circ$ 로 충돌하는 경우에 분위기 가스 밀도( $\rho_a$ )가  $18\text{kg/m}^3$ 에서 분위기 온도( $T_a$ ) 293K, 473K의 분무형상이다. Fig.

3(b)는 분무가 충돌판에 충돌각( $\alpha$ ) $30^\circ$ 로 충돌하는 경우,  $\rho_a=18\text{kg/m}^3$ 에서 분위기 온도  $T_a=293\text{K}$ 와  $T_a=473\text{K}$ 의 분무형상이다. (a), (b)의  $T_a=293\text{K}$ 에서의 분무는 충돌판에 충돌한 후 분무 선단부위가 상류방향으로 튀기는 형상을 볼 수가 있으며, 선단 끝 부분에서는 충돌판과 약간의 간격이 있음을 관찰 할 수 있다. 반면  $T_a=473\text{K}$ 에서는 분무가 충돌판에 충돌한 후 분무 선단부위의 분무는 충돌벽을 따라 흐르는 형상을 보인다. 이는 온도상승으로 액적증발이 일어나 액적자체의 운동량이 감소하면서 분무가 충돌벽면을 따라 밀려나기 때문으로 판단된다.

### 3.2 분위기밀도에 따른 분무의 특성

충돌분무의 특성에 미치는 분위기 밀도의 영향을 검토하기 위해 분위기밀도를 18, 24, 30  $\text{kg/m}^3$ 으로 변화시켜가며 실험을 수행하였다. Fig. 4~Fig. 7에 이 결과를 보인다.

Fig. 4는  $T_a=293\text{K}$ 의 분위기 온도조건에서 충돌각도  $\alpha=0, 30, 45^\circ$ 로 하였을 때 밀도 변화에 따른 하류방향 분무반폭( $r_{wl}$ )의 변화결과이다.  $r_{wl}$ 은 충돌각에 관계없이 분위기 밀도가 증가할수록 감소하고 있으며, 충돌각이 커짐에 따라  $r_{wl}$ 도 증가한다.  $\alpha=30^\circ$ 로 증가시 분무초기에는 비슷하지만 시간이 지남에 따라 분무의 반폭은 밀도가 증가함에 따라 감소한다. 그러나 충돌각이  $\alpha=45^\circ$ 로 증가한 경우 분무반폭은 증가하나,  $\rho_a=24, 30\text{kg/m}^3$ 의 경우는 비슷한 결과는 보인다. 결과로부터 밀도의 영향이 충돌각도보다 분무반폭성장애 작게 영향을 미치고 있음을 알 수 있다.  $\alpha=0, 30, 45^\circ$ 의 어느 충돌각에서도 분위기 밀도가 증가함에 따라  $r_{wl}$ 은 감소하는 경향을 보인다. 즉, 밀도의 증가는  $r_{wl}$  성장애 많은 영향을 미치고 있으며, 밀도가 증가할수록 하류방향 분무반폭은 감소하고 있다. 이는 증가한 밀도가 분무성장애 저항으로 작용하기 때문이라 생각된다. 한편  $\alpha=45^\circ$ 이고  $\rho_a=24, 30\text{kg/m}^3$ 일 때는  $r_{wl}$ 의 차이가 거의 없는데, 이는 증가한 충돌각  $\alpha=45^\circ$ 에서

일정 분위기 밀도 이상으로는 그 영향이 미비하게 나타남을 의미한다.

Fig. 5는 Fig. 4와 동일한 조건에서 분위기 온도를  $T_a=473\text{K}$ 으로 상승시킨 실험결과이다. 밀도 변화 및 충돌각 변화에 따른  $r_{wl}$ 의 결과는 상온에서의 결과와 비슷한 경향을 보인다. 또한,  $\alpha=45^\circ$ 일 때 밀도  $\rho_a=24, 30\text{kg/m}^3$ 에서 밀도의 영향이 작게 나타나고 있다.

Fig. 6, 7은 하류방향 분무 상승두께( $h_{wl}$ )의 밀도 변화에 따른 영향을 평가하기 위한 그래프이다. Fig. 6은  $T_a=293\text{K}$ , Fig. 7은  $T_a=473\text{K}$ 일 때의

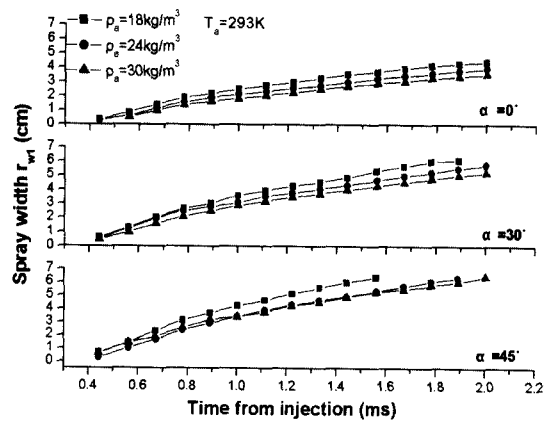


Fig. 4 Change of spray radius in downstream( $r_{wl}$ ),  $T_a=293\text{K}$

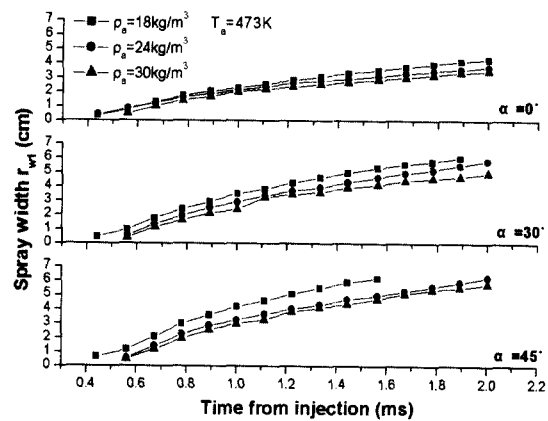


Fig. 5 Change of spray radius in downstream( $r_{wl}$ ),  $T_a=473\text{K}$

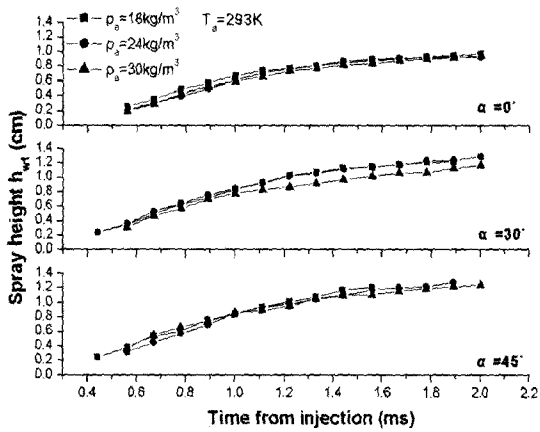


Fig. 6 Change of spray height in downstream ( $h_{w1}$ ),  $T_a = 293K$

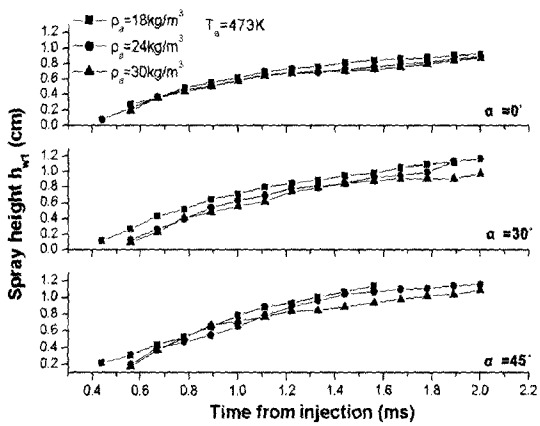


Fig. 7 Change of spray height in downstream ( $h_{w1}$ ),  $T_a = 473K$

결과를 보인다.

$T_a = 293K$ 일 때는 어느 충돌각도에서나 밀도 변화의 영향은 거의 나타나지 않고, 시간에 따라 완만하게 성장하고 있다. 그러나  $T_a = 473K$  경우, 충돌각도  $\alpha = 35, 45^\circ$ 에서는 밀도의 영향이 약간 나타난다. 이는 밀도가 커지면 충돌분무의 충돌 후 공기 유입이 늘어나 미립화가 촉진되고, 온도의 상승은 미세액적들의 증발을 촉진시켜 밀도 증가 시 증발한 분무가 운동량을 상실하여 밀도의 영향을 크게 받아 성장이 둔화되어  $h_{w1}$ 의 감소로 이어지는 것으로 판단된다.

### 3.3 분위기온도가 충돌분무특성에 미치는 영향

본 연구에서는 분위기 온도 변화가 분무특성에 미치는 영향을 검토하였다. 이들 결과를 Fig. 8~11에 나타내었다.

Fig. 8은 충돌각  $\alpha = 45^\circ$ 일 때 분위기 온도변화가 하류방향 분무 반폭( $r_{w1}$ )에 미치는 결과이다. 하류방향 분무 반폭은 하류방향 분무상승두께( $h_{w1}$ )와는 달리 반경방향으로 진행이 빠르고 신속히 진행되며 그 거리도 Fig. 9와 비교 시 상승두께의 5배정도로 충돌면을 따라 급격히 확산되고 있다.

충돌각도가  $\alpha = 45^\circ$ 인 경우, 분무반폭의 성장속도가 빠르고, 전체적으로 일정하게 증가하며, 밀도가 증가한 경우에는 온도 변화에 따른 영향이 점차 크게 나타난다. 이는  $\alpha = 45^\circ$  이상이고, 이는  $\alpha = 45^\circ$  이상에서는 분무 반폭성장에 미치는 온도 증가의 영향이 밀도 증가로 인해 약화되기 때문이라 판단된다.

Fig. 9는  $\alpha = 45^\circ$ 인 경우 상류방향 분무반폭의 결과이다. 상류방향의 분무반폭은 상온 일 경우가  $T_a = 473K$ 보다 전 분사기간 동안 약간 크게 나타난다. 그러나 밀도를 더욱 상승시켰을 경우, 온도 변화에 따른 영향은 거의 없이 일치하고 있다. 이는 온도변화에 따른 영향보다 밀도증가에 따른 영향이 상류방향 분무반폭에 더 큰 영향이 있

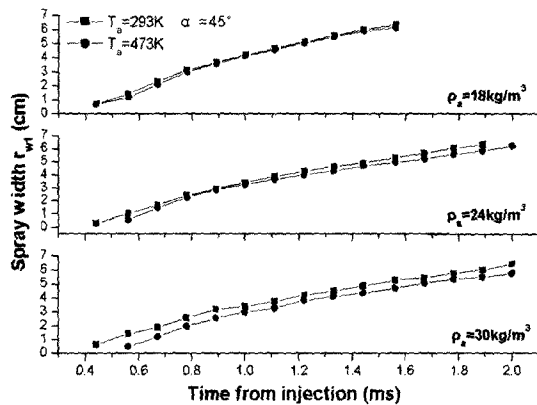


Fig. 8 Change of spray radius in downstream ( $r_{w1}$ )

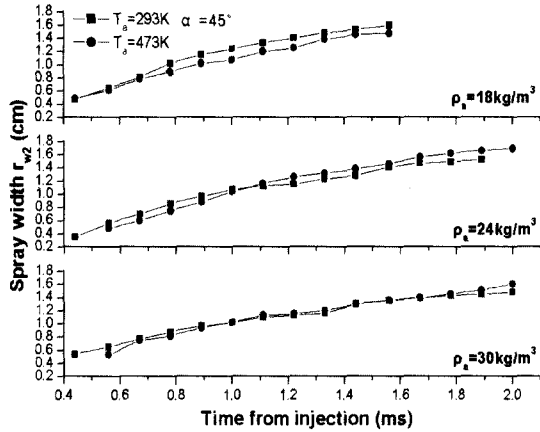


Fig. 9 Change of spray radius in upstream( $r_{w2}$ )

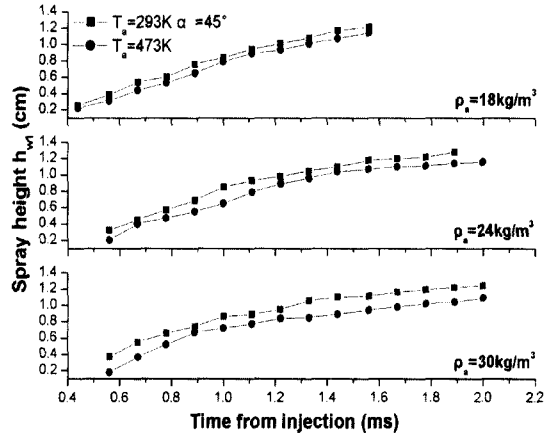


Fig. 10 Change of spray height in downstream( $h_{w1}$ )

음을 알 수 있다.

Fig. 10, 11은 온도증가에 따른 하류방향( $h_{w1}$ )과 상류방향( $h_{w2}$ )의 분무상승 두께의 결과이다. 온도 증가에 따른 하류방향 분무 상승두께는 상온의 경우가 약간 크게 나타나고 있으며, 분위기 온도에 의한 영향이 더욱 나타난다. 밀도를 증가시켰을 경우 분위기 온도에 의한 영향이 더욱 나타난다.

충돌초기  $T_o=473\text{K}$ 의 경우, 충돌 후 충돌판 표면이 분위기 온도보다 약간 높아 운동량이 큰 액적들이 부딪혀 튀어 오르면서 미소 액적들과 함께 높은 밀도균을 형성하고, 부유하면서 분무두께를 형성하는 것으로 판단된다. 분무후기로 갈수록 증발효과로  $T_o=293\text{K}$ 가 약간 크게 나타나는 것으로 생각된다.

충돌각  $\alpha=45^\circ$ 의 경우는 온도에 따른 효과가 전 분사기간에 뚜렷이 나타났다. 그 값은 약 0.1~0.2cm 정도이며 밀도가 클수록 하류방향 상승 두께는 주위저항으로 작아짐을 알 수 있다.

온도가 증가하는 경우에서  $r_{w1}$ ,  $r_{w2}$ ,  $h_{w1}$ ,  $h_{w2}$ 의 크기가 모두 감소하였다. 이는 충돌 후 분열된 미세액적들의 온도에 의한 증발 후 운동량 상실과 온도가 높아짐에 따라 상승한 압력으로 분사차압이 온도가 높아질수록 작아져, 온도가 상승함에 따라 분무의 성장이 느린 것으로 추측된다.

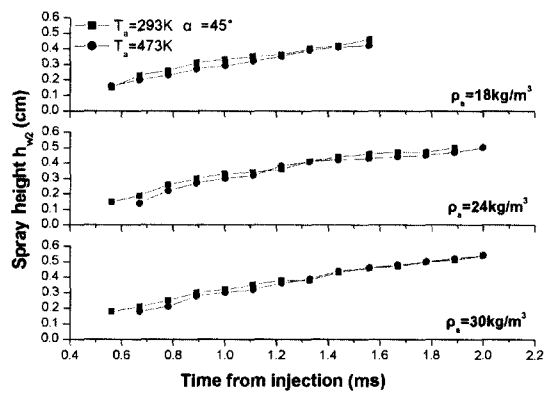


Fig. 11 Change of spray height in upstream( $h_{w2}$ )

### 3.4 충돌각도가 분무특성에 미치는 영향

실린더 내에 분사된 분무는 연소실의 형상 및 피스톤이 상승함에 따라 다양한 각도로 충돌하게 된다. 충돌하는 각도에 따라 분무의 특성이 다르게 나타나므로 본 실험에서는 3개의 충돌각도로 분무를 충돌시켜 분무특성을 관찰하였다. Fig. 12~16은 충돌각도  $\alpha=0, 30, 45^\circ$ 에 따른 하류방향 분무반폭( $r_{w1}$ )의 결과이다. Fig. 12는 충돌각 변화에 따른  $r_{w1}$ 의 변화를 시간에 따라 나타내었다. 충돌각도가 증가함에 따라  $r_{w1}$ 은 증가하고 있다. 이는 충돌각도가 증가할수록 분무 진행방향으로 저항이 작아져 하류방향 분무 반폭이 증가한다. Fig. 13은  $T_o=473\text{K}$ 인 경우  $r_{w1}$ 의 결

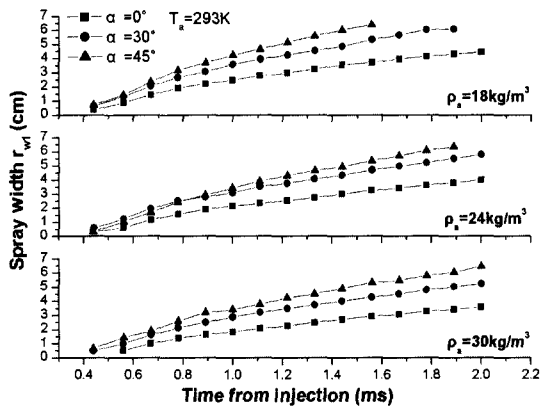


Fig. 12 Change of spray radius in downstream( $r_{w1}$ )

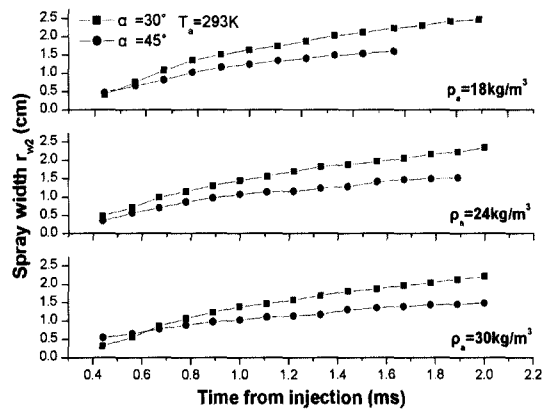


Fig. 14 Change of spray radius in upstream( $r_{w2}$ )

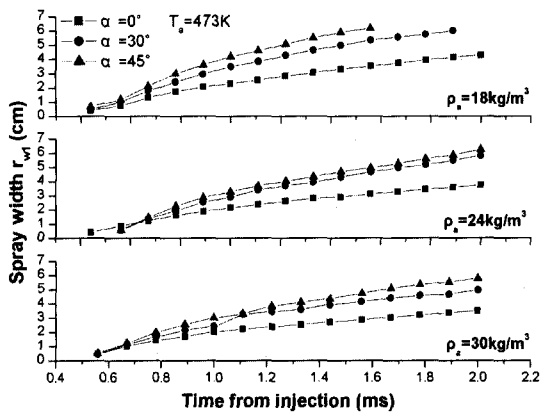


Fig. 13 Change of spray radius in downstream( $r_{w1}$ )

과를 나타내었다.  $T_a=473K$ 일 때도, 상온과 거의 같은 경향을 보이고 있다.

Fig. 14는 충돌각에 따른 하류방향 분무반쪽( $r_{w2}$ )의 변화를 보인다. 그림에서 보이는 것처럼 충돌각이 증가함에 따라  $r_{w2}$ 는 감소하고 있다. 이는 충돌각이 증가함에 따라 운동량 변화로 충돌한 후 상류방향으로 분무의 성장이 억제되기 때문으로 생각되며, 이러한 현상은  $r_{w1}$ 의 증가를 촉진시킨다.  $r_{w2}$ 는  $r_{w1}$ 의 1/5정도로 상류방향 분무반쪽발달이 더욱 더디게 진행되고있음을 보이고 있으며, 경사각이 클수록 현저하게 나타나고 또한 온도가 증가할수록, 밀도가 상승할수록 성장은 많이 둔화된다.

Fig. 15는 충돌각도에 따른 하류방향 분무상승 두께( $h_{w1}$ )의 결과이다.  $\alpha=0^\circ$ 의 수직충돌분무의 경우가  $h_{w1}$ 이 가장 작으며,  $\alpha=30, 45^\circ$ 의 경우 거의 비슷하게 증가하였다. 그러나  $\rho_a=30kg/m^3$ 으로 증가한 경우 충돌각  $\alpha=45^\circ$ 의 결과에서는 전체적으로 크게 나타났으며, 크기는  $\alpha=30, 0^\circ$ 순이었다. 이는 충돌각도에 영향을 주기 시작하는 밀도값으로  $\rho_a=30kg/m^3$  정도로 판단된다. 즉 소형 디젤엔진의 압축종료시 밀도( $\epsilon=16$ )가  $19kg/m^3$  정도인 것을 고려해 볼 때 상온에서는 충돌판을  $45^\circ$ 로 연소실 벽면에 충돌시켰을 때 밀도를  $10kg/m^3$  이상으로 높여주어야 하류방향 분무상승 두께를 증가시킬 수 있다.

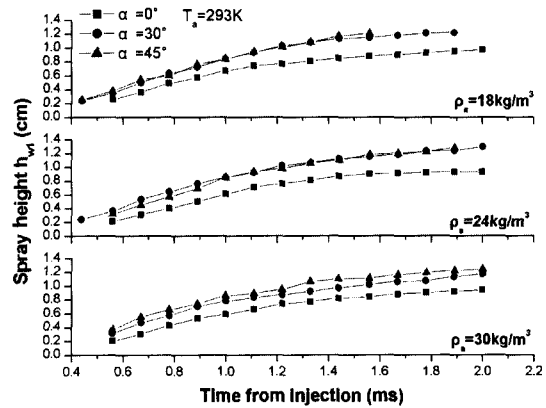


Fig. 15 Change of spray height in downstream( $h_{w1}$ )

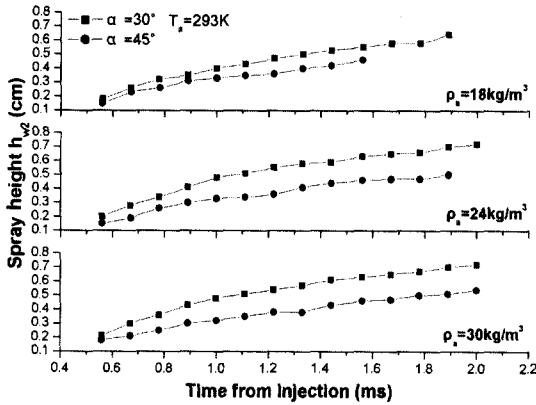


Fig. 16 Change of spray height in upstream(  $h_{ws}$  )

Fig. 16은 충돌각도에 따른 상류방향 분무 상승두께(  $h_{ws}$  ) 결과이다. 분무상승두께는 충돌각도가 증가할수록 작아진다. 또한 분위기 가스 밀도가 커진 경우에는 충돌각도의 영향이 크게 나타나고 있다. 이는 분위기 가스 밀도증가에 따른 주위 저항이  $\alpha=30^\circ$ 인 경우에 더 크게 작용하고 있음을 나타낸다. 또한 밀도가 증가함에 따라 반경방향의 진행은 위축되지만 상류방향 분무 상승두께는 약간 커지는 경향을 보이고 있다. 그러나 전체적으로  $\alpha=30, 45^\circ$ 에서의 분무상승 두께 값은 크게 발달이 진행되지 않는 경향을 보인다.

#### 4. 결론

본 연구의 실험결과로부터 충돌분무의 특성은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

- 1) 분위기 온도가 상온인 경우 충돌분무는 반발되는 모습을 보이나, 고온의 경우 충돌면을 따라 진행된다.
- 2) 분위기 온도 및 밀도의 증가에 따라 하류분무반쪽 발달은 미세하나, 충돌각도의 영향은 크

게 나타난다. 즉, 노즐과 연소실 관계에서 연소실과 노즐과의 충돌각도가 중요 인자이다.

- 3) 상류 방향의 분무 반쪽과 상승 두께는 실험 범위의 인자에 의한 영향은 적으며, 크기는 하류 방향의 1/5 수준이었다.

#### 참 고 문 헌

- 1) H. Hiroyasu, "Experimental and Theoretical Studies on the Structure of Fuel Sprays in Diesel Engines," Fifth International Conference on Liquid Atomization and Spray Systems, ICLASS B, pp. 17-31, 1991.
- 2) K. K. Song, H. Hiroyasu, T. Yoshizaki, "Three-Dimensional Spray Distributions in a Direct Injection Diesel Engine," SAE 941693, 1994.
- 3) M. Suzuki, K. Nishida, H. Hiroyasu, "Simultaneous Measurement of Fuel Vapor Concentration and Droplets Density in an Evaporating Diesel Spray with Laser Light Absorption and Scattering (1st Report, Development of Measuring Technique)," Transaction of JSME, Vol.59, No.558, B, pp.329-337, 1993.
- 4) J. Senda, Y. Fukami, Y. Tanabe, H. Fijimoto, "Visualization of Evaporative Diesel Spray Impinging upon Wall Surface by Explicit Fluorescence Method," SAE 920578, 1992.
- 5) 박권하, 김진환, 김재휘, "충돌면 경사각도에 변화에 따른 분무특성," 한국자동차공학회 논문집, 제6권 제6호, pp.63-71, 1998.
- 6) T. Ebara, K. Amagai, M. Arai, "Movement and Structure of Diesel Spray Impinging on an Inclined Wall," SAE 970046, 1997.
- 7) 차건중, 김덕출, "돌 분무 내부구조와 미시적 거동에 관한 연구," 대한기계학회 논문집, 제 23권 제4호, pp.470-478, 1999.