

# 고온벽면에 충돌하는 디젤분무의 특성 연구

## Characteristics of a Diesel Spray Impinging on the Hot Plate

문 석 범\*, 구 자 예\*\*  
Seokbum Mun , Ja Ye Koo

### ABSTRACT

An experimental investigation of unsteady impinging DI diesel spray on the unheated plate and heated plate has been conducted in a pressurized chamber using high speed shadowgraphy. The ambient gas pressure was varied using nitrogen with chamber pressure of 1.1MPa, 2.1MPa and 2.6MPa. As the increase of ambient gas pressure, the radial penetration is decreased due to the resistance of the ambient gas. As the increase of ambient gas pressure, the height of spray is increased due to the increase of entrainment and circulation. At higher temperature of impinging plate, the radial penetration of the impinging spray is increased, but the height of impinging spray is decreased.

주요기술용어 : Unsteady Impinging Diesel Spray(비정상 디젤충돌분무), Hot Plate(고온벽면), Height of Spray(분무높이), Radial Penetration(반경방향 침투)

### Nomenclature

R : spray radius, mm  
H : spray height, mm

### Subscripts

w : Wall  
g : Gas

### 1. 서론

최근 들어 환경규제가 강화됨에 따라 디젤 엔진의 입자상 물질을 저감하는 방법으로 고압 분무가 시도되고 있으며 고압 분무와 더불어 분사 시기를 지연하면 입자상 물질과 NOx를 동시에 줄일 수 있다[1]. 고압 분무시에는 분무가 피스톤 보울과 직접적으로 충돌할 수 있다. 또한 고속 소형 디젤엔진에도 직접 분사 방식을 채택하고 있다[2]. 이에 따라 직접 분사식 디젤 엔진의 연소

\* 정회원, 한국항공대학교 대학원  
\*\* 정회원, 한국항공대학교 항공기계공학과

현상 및 효율 개선과 밀접한 관계가 있는 충돌분무의 특성과 분무의 미립화가 많은 관심사가 되고 있다. 분사된 연료 분무가 엔진 내부와 충돌하면서 나타나는 여러 특성들은 연료의 미립화, 연소현상 및 유해 배출가스 저감 등과 관계가 있다. 특히 저온 시동시 피스톤 상부면에 충돌된 액적들은 연소실 및 피스톤 상부면에 부착되어 매연을 발생시키는 주요 요인이 될 수도 있다.

Yule등은 가압조건에서 횡단유동(cross flow)이 있는 경우의 충돌분무 특성을 연구하여 충돌분무의 반경방향 침투거리가 횡단유동의 세기 및 분무실 압력과 관계가 있음을 밝혀냈고, Jiro Senda등은 가압조건에서의 충돌분무 연구에서 충돌분무의 거시적 발달특성이 분무실의 밀도비등과 관련이 있음을 알아내고 실험식을 제시하였다. Takahashi[3]등은 대기압하에서 여러 가지 개변압에 대한 분무 초기의 미립화 특성을 연구하였고, Bracco[4]등은 인젝터의 조건 및 주위 환경 변화에 따른 분무선단거리, 분무각 등의 특성을 연구하였다.

그러나 여전히 실제 엔진에서 일어나는 여러 가지 유동과 열전달 현상을 규명하는데는 다양한 실험 데이터가 절실히 요구되고 있다. 따라서 본 연구에서는 질소를 이용하여 가압한 정적 분무실 내에 분사된 디젤 연료가 저온 또는 고온의 충돌판에 충돌한 후의 거동을 고속카메라를 이용하여 조사하고, 고온의 충돌판에 충돌하였을 경우 고속응답 열전대를 이용하여 열전달 현상을 조사하였다.

## 2. 실험장치 및 실험방법

Fig. 1은 실험에 사용된 노즐을 나타낸다. 노즐은 단공(single-hole), 홀타입(hole-type)으로 직경은 2 mm,  $L/d = 4$ 이다. 상용으로 사용되는 것은 보통 다공(multi-hole) 노즐이지만 실험의 편의상 상용으로 사용되는 노즐 중심에 구멍을 하나만 뚫어 사용하였다. 노즐에 공급되는 압력은 노즐의 연료 유입구에 압력센서(Kistler,

Type 4608)를 부착하여 측정하였다.

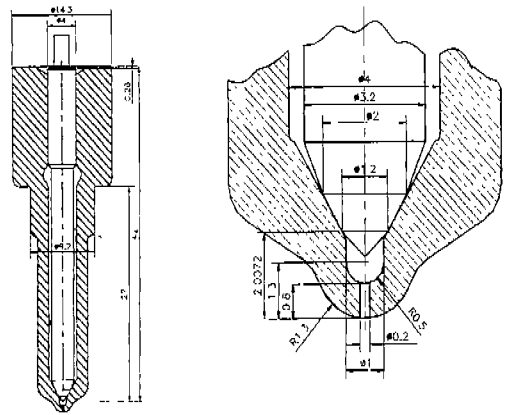


Fig. 1 Cross section of nozzle

Fig. 2는 분사 펌프의 속도가 800 rpm일 때의 분사 압력을 나타내고 있다. 노즐의 개변압은 약 200 bar 이고 분사기간은 3 ms 정도이다. 압력이 개변압을 넘으면서 니들 밸브는 열리기 시작하고 니들 밸브가 열려 유로가 넓어진 영향으로 압력이 약간 감소하다가 다시 상승하는 것을 볼 수 있다. 1회 분사시 분사된 연료의 양은 12 mg이다.

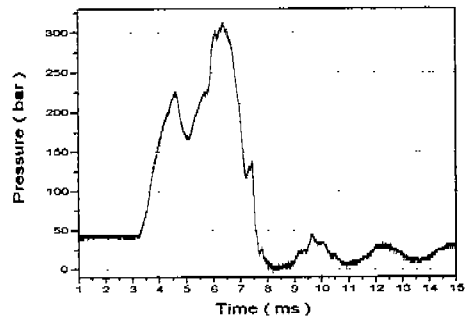


Fig. 2 Injection pressure (800 rpm)

Fig. 3은 단발분사를 위한 실험장치의 구성도이다. 연소과정이 없는 충돌분무의 연구에서 분무가 분무실 중앙에 설치된 판에 여러 번 충돌하게 되면 충돌판에 연료 액막(fuel film)이 형성되고 주위의 흩날리는 분무 입자로 인해 충돌분무

의 특성을 정확하게 파악할 수 없다. 이로 인해 연료 맥락과 흘날리는 분무 입자의 영향을 받지 않는 단발 분사가 필수적이다[5]. 또한 이러한 단발 분사는 실제의 분사 압력 및 유량과 유사한 특성을 가져야 한다. 본 연구에서는 단발분사가 실제분사와 유사성을 가지도록 분사 펌프의 랙(rack)을 이용하여 유량을 조절하고 인젝터 상부에 부착되어 있는 압력계로부터 압력을 측정하였다.

실험장치는 연료 분사를 위한 정적분무실, 분무실을 가압하여 정압조건으로 만들기 위한 질소 탱크, Doowon KP-PE6A100D 분사 펌프, 분사 노즐, 분사 펌프의 rpm을 조절하고 유량을 측정하는 분사 펌프 테스트 벤치, 고속사진 촬영을 위한 고속카메라장치로 구성되어 있다. 연료는 분사 펌프에서 송출되어 솔레노이드 밸브에 의해 분무실에 있는 노즐 또는 더미 노즐에 공급된다. 솔레노이드 밸브는 평소에는 더미 노즐 쪽으로 열려있다. 이 때에는 분사실 노즐의 개변압 보다 더미 노즐의 개변압이 낮기 때문에 더미 노즐 쪽으로만 분사가 일어난다. 제어 신호가 솔레노이드 밸브에 가해지면 순간적으로 더미 노즐 쪽의 유로를 차단함으로써 분무실로의 분사가 일어난다.

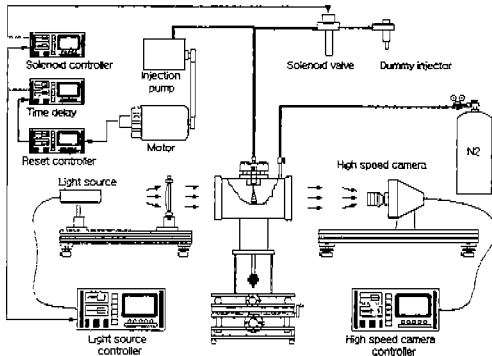


Fig. 3 Schematic of injection system

Fig. 4는 제어신호의 흐름을 나타낸다. 모든 제어 신호의 기준은 테스트 벤치 모터에 부착되

어 있는 인코더의 Z펄스이다. 일정한 회전각에 도달하였을 때 인코더는 Z펄스를 발생시키고 이 신호는 리셋(reset)장치로 유입된다. Z펄스는 모터가 회전함에 따라 연속적으로 발생하는데 단발 분사 실험에 필요한 Z펄스는 단 하나이다. 리셋 장치는 연속적으로 발생하는 Z펄스중에서 단 하나만을 골라내는 역할을 한다. 리셋장치로부터 나온 신호는 시간지연장치로 유입된다. 시간지연 장치는 입력받은 신호를 기준으로 두 개의 지연된 신호(채널 1, 채널 2)를 발생한다. 채널 1은 솔레노이드 밸브 컨트롤러로 입력되어 솔레노이드 밸브를 작동시키고, 채널 2는 광원 컨트롤러(Model 447A light source controller)로 입력되어 플래쉬를 작동시킨다. 이때 카메라의 셔터는 열려있는 상태인 B셔터이다. 카메라의 셔터가 열려있어도 고속카메라의 렌즈로부터 rotating mirror를 통과하여 drum에 이르기까지의 광경로가 길기 때문에 일반적인 실내 조명만으로는 필름에 감광효과를 주지 못하고 강한 플래쉬 램프의 빛에 의해서만 필름이 감광된다. 본 실험에 적용된 사진촬영 속도는 25000 frame/s이다.

분무실은 강철 원통형 구조로 되어있고, 양쪽의 창은 강화유리로 제작되어 30bar까지의 압력을 견딜 수 있다. 또한 양쪽 창에 실리콘 실링을 하여 압력의 유출을 막았고, 분무실에 설치된 압력계로부터 내부압력을 확인할 수 있다. 분무실 내부의 중앙에는 충돌분무를 위한 충돌판이 설치되어 있다.

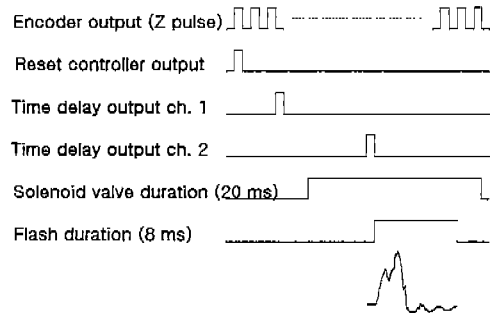


Fig. 4 Flow of control signal

Fig. 5는 실험에 사용된 고온 충돌판을 나타낸다. 충돌판을 설계하는데 있어서 가장 중요한 것은 충돌판 전체가 고른 온도분포를 가져야 하고, 충분한 두께를 가져서 열전달 계산에서 사용된 모델인 semi-infinite plate 가정을 만족시키는 것이다. 제작된 충돌판은 직경 80mm, 두께 20mm의 원형으로 연속분사 개시후 약 3-4초 후에 밀면의 온도가 변하기 시작했다. 연료분사기간이 불과 3ms정도이고 이동한 충돌판 밀면의 온도는 변하지 않으므로 충돌판은 semi-infinite plate 가정을 만족시킬만한 충분한 두께를 가지고 있다고 볼 수 있다.

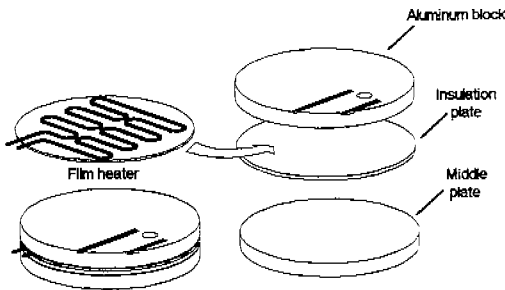


Fig. 5 Hot impinging plate

디젤 분무가 충돌판 표면에 충돌할 때 분무와 충돌판 표면 사이에서는 강제 대류 열전달이 발생한다. 충돌판 표면의 열전달을 측정하는 방법으로는 열유속 센서를 이용하는 직접적인 방법과 표면의 온도를 측정하여 열전달을 계산하는 간접적인 방법이 있다[6]. 본 실험은 측정 면적이 작고 응답시간이 수  $\mu s$  정도 되어야 하므로 열유속 센서를 이용하는 것은 적합하지 않아 응답시간이  $10\mu s$ 인 고속응답 열전대를 이용하여 표면의 온도 변화를 측정하는 방법을 이용하였다. 열전대를 좀 더 넓은 이송범위를 갖도록 하기 위해 충돌판 중앙에 설치하지 않고 중심에서 20 mm 떨어진 곳에 충돌판 밀면에서 윗면으로 관통하도록 설치하고, 충돌판과 열전대 사이의 미세한 공간은 열전달 특성이 아주 좋은 에폭시(OMEGA)로 충전하였다.

본 연구에서는 정적분무실의 압력  $P_g$ 를 0.1MPa, 1.1MPa, 2.1MPa, 2.6MPa로 노즐과

충돌판 사이의 거리  $L$ 을 10mm, 20mm, 30mm, 40mm로 충돌판 표면의 온도  $T_w$ 를  $24^\circ C$ ,  $120^\circ C$ 로 변화시키면서 액막이 없는 건조한 충돌판(dry surface)에 충돌하는 연료분무의 고속카메라 촬영과 분무가 충돌시 충돌판에서 일어나는 열전달을 측정하였다. 이때 분무는 열전대의 중심에 충돌하고 디젤 연료의 온도는  $40^\circ C$ 이다.

### 3. 결과 및 고찰

Fig. 6은 충돌분무의 가상 모델을 나타낸다. 노즐과 충돌판 사이의 거리는  $L$ , 충돌판으로부터의 충돌분무 높이를  $H$ , 분무 중심에서 분무 선단의 반경방향 발달길이를 분무반경이라 하며  $R$ 로 나타낸다. 노즐에서 분사된 분무는 판에 충돌한 후 벽면을 따라 제트를 형성하고 분무 선단에서는 벽면제트와류(wall-jet vortex)를 발생시킨다. 벽면제트와류는 분무 선단에서 연료액적과 주변공기와의 혼합을 촉진시킨다[7,8]. 판에 충돌하기 전까지의 분무는 주변공기를 분무의 흐름 방향으로 유입하고, 유입공기 정도에 따라 충돌분무의 발달과정은 달라진다.

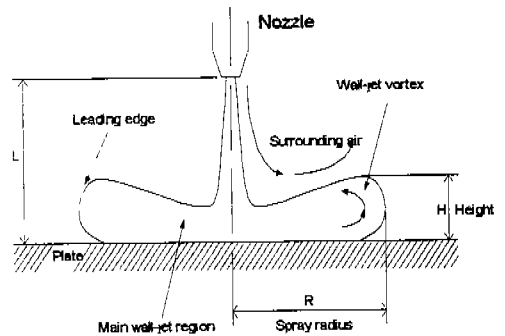


Fig. 6 Impinging model

Fig. 7 (a), (b)는 충돌판이 가열되지 않는 경우( $T_w=24^\circ C$ )와 가열된 경우( $T_w=120^\circ C$ ), 충돌분무의 연속사진을 나타낸 것이다. 여기서 시간  $t$ 는 분무가 충돌판에 충돌한 시점을 0으로 정했다. 판에 충돌한 액적들은 디스크 형태의 모양을 이루면서 벽면을 따라 흐르며 이 과정 중 어느 정

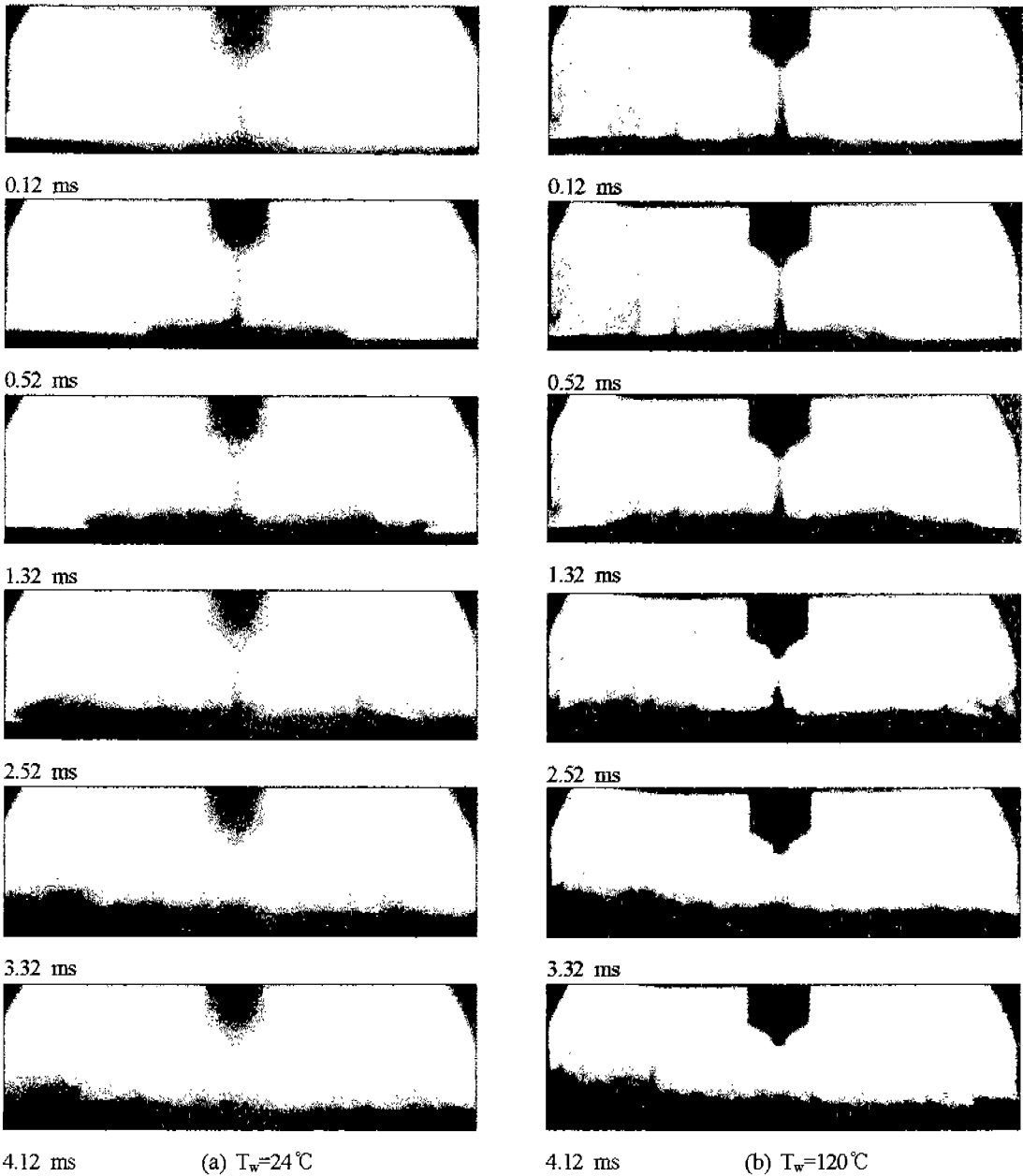


Fig. 7 High speed photograph of impinging spray ( $P_g=1.1\text{MPa}$ ,  $L=10\text{mm}$ )

도의 액적들은 충돌판에 액막을 형성한다. 충돌 후 약 2ms가 경과하면 디스크 형태의 분무는 점차 오목하게 되면서 분무 선단 부분이 위쪽으로 발달한다. 분무 선단에 있던 액적들이 점차 운동량을 잃고 윗쪽으로 밀려나면서 분무의 높이가

점점 증가함과 동시에 정체 영역이 생겨나기 때문이라 생각된다. 충돌판이 가열된 경우는 가열되지 않는 경우에 비하여 충돌분무의 반경이 더 빨리 발달하며 분무높이가 낮음을 알 수 있다.

Fig. 8은 충돌판과 노즐사이의 거리  $L$ 이

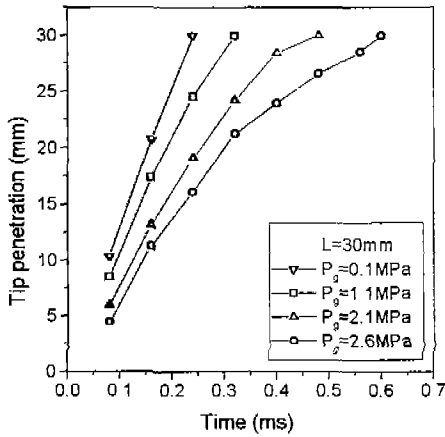


Fig. 8 Tip penetration before impinging

30mm인 경우 각각의 분무실 압력에 따라 분무 선단이 충돌판에 충돌하기 전까지의 과정을 나타낸 것이다. 분무실 압력이 낮은 경우에는 도달 시간이 매우 빠르고 선형적인데 비해 압력이 높을수록 분무 도달 시간이 느려지고 선단 도달거리가 시간에 대해 비선형적이며 분무가 충돌판 가까이 도달할수록 상대적인 속도가 점점 느려진다.

Fig. 9는 충돌판이 가열되지 않은 24°C에서 충돌거리 L과 분무실 압력에 따른 충돌분무의 반경 방향 발달 및 충돌분무의 높이를 나타낸다. 여기서 시간 t는 분무가 판에 충돌할 때의 시각을 t=0으로 정하였다. Fig. 9(a), (b)는 L=10mm, Fig. 9(c), (d)는 L=30mm의 경우이다. Fig. 9(a), (c)

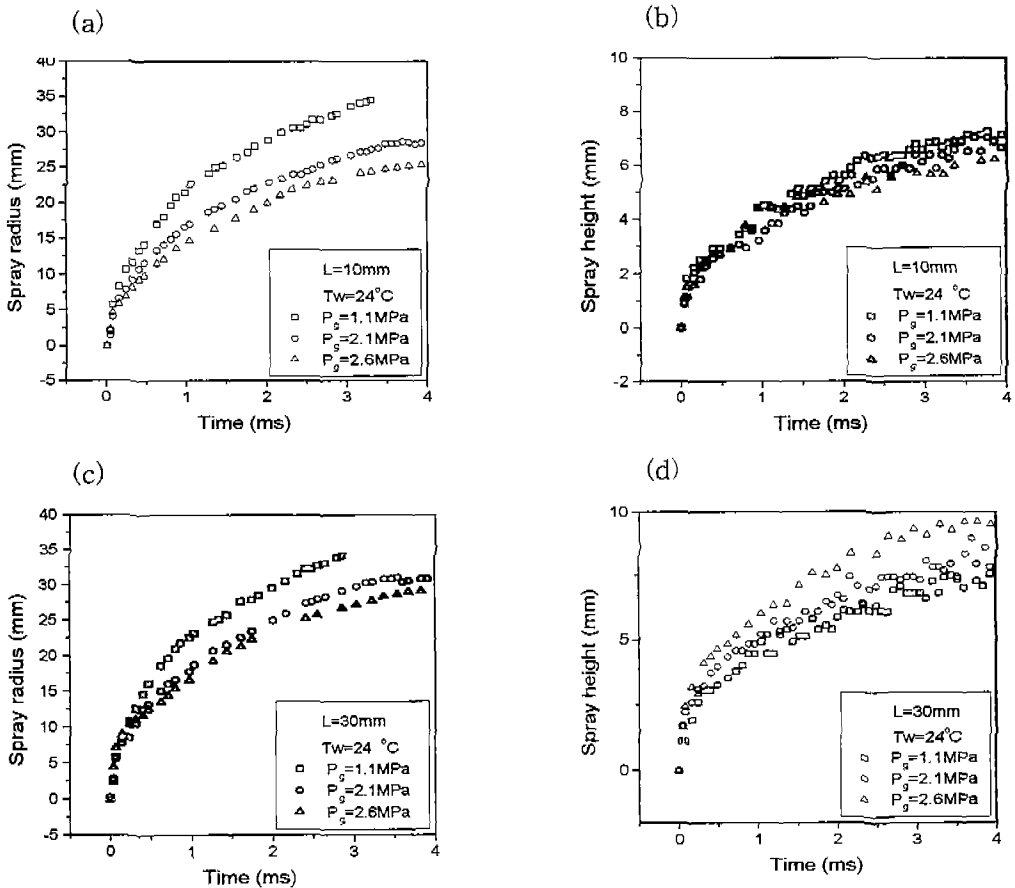


Fig. 9 Effect of ambient pressure on the development of impinging spray into the unheated plate ( $T_w=24^\circ\text{C}$ )

에서 보던 충돌판의 위치에 따라 반경방향 분무 발달은 별 차이가 없으나 분무실 압력이 증가할수록 반경방향으로 더 늦게 분무가 발달하고 있다. 압력이 높으면 주변공기로의 운동량전달이 급속히 이루어지고 높은 가스압력에서는 분무의 반경방향으로의 퍼짐이 방해받기 때문이라고 생각된다. Fig. 9(b), (d)에서 분무실 압력이 높아지고 충돌판의 거리가 증가할수록 분무높이는 더 빨리 발달함을 알 수 있다. 이는 압력이 증가할수록 분무는 주변공기에 더 많은 운동량을 전달하고 이로 인해 분무 주변에는 더 큰 순환이 발생하기 때문이라고 생각된다. 분무 선단 주변의 속도가 낮은 액적들, 즉 주변의 공기에 운동량을 빼앗겨 속도가 낮아진 액적들은 벽면제트에 의해 위로 밀려 올라가 정체 영역을 형성하고 압력이 높을수록 이러한 액적들이 많아지므로 그만큼 정체영역과 순환영역이 발달해 분무의 높이가 높아지는 것으로 판단된다.

Fig. 10은 충돌판의 온도가 24°C인 경우, 고속도 카메라를 이용하여 촬영한 분무의 연속사진을 실측한 결과이며, Fig. 10(a)에서 분무실 압력이 높아지면 충돌분무의 반경방향 발달 R은 작아지고 충돌분무의 높이 H가 커짐을 알 수 있다. 동일 분무실 압력에서 충돌판거리가 분무발달에 미치는 영향은 Fig. 10(b)에서 볼 수 있다.

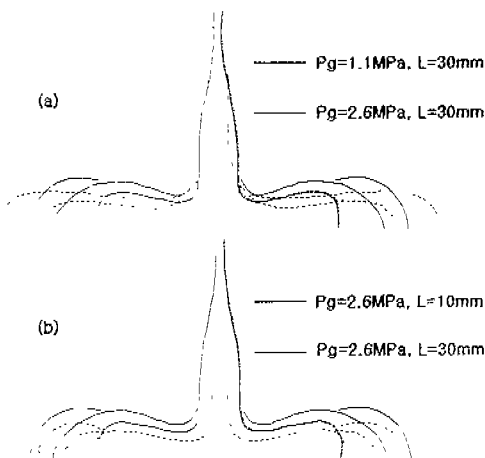


Fig. 10 Development of impinging spray

고온 평판에 충돌하는 분무의 거동을 알아보기 위해 120°C로 가열된 평판을 가압 분무실 내에 설치하여 실험을 수행하였다. 실험조건은 저온 평판에서의 마찬가지로 노즐과 충돌판 사이의 거리 L과 분무실 내의 압력 Pg를 변경하였다.

Fig. 11은 분무가 저온의 평판(a)과 고온의 평판(b)에 충돌하여 발달하는 모습을 비교한 것이다. 분무실 압력은 2.6MPa, 충돌판 위치는 분무 노즐에서 20mm이며 시간 t는 분무가 판에 충돌한 후 2.4ms가 경과한 시각이다. 고온 충돌판의 경우는 저온 충돌판인 경우보다 벽면제트의 주흐름은 충돌판 부근에서 발달하며 분무높이가 낮고 반경방향의 발달속도가 빠름을 알 수 있다. 이러한 경향은 Fig. 12에서도 나타남을 알 수 있다. L=10mm(Fig. 12(a),(b)), L=30mm(Fig. 12(c),(d)) 모두 고온 충돌판의 경우가 반경방향 발달이 빠르고 충돌분무 높이가 낮음을 알 수 있다. J-C. Chang[7,8]은 그의 연구에서 저온 평판에 충돌하는 분무는 고온 평판에서보다 큰 직경의 액적들을 만들어내고, 이 액적들은 평판에 두꺼운 정체성의 액막을 형성하며 충돌하는 액적들의 튀기는 현상(splashing)을 증가시킨다고 하였다. Fig. 11(a)에서 나타나는 현상 역시 이러한 이유에 의해 분무의 반경방향 속도가 작고 벽면

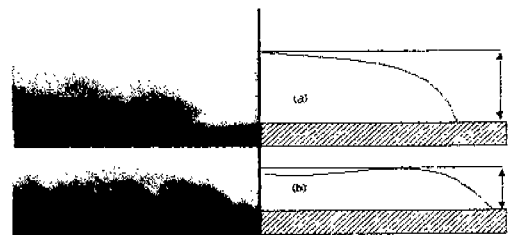


Fig. 11 Comparison of spray behavior between unheated and heated plate (a) unheated plate( $T_w=24^\circ\text{C}$ ) (b) heated plate( $T_w=120^\circ\text{C}$ ) ( $P_g=2.6\text{MPa}$ ,  $L=20\text{mm}$ ,  $t=2.4\text{ms}$  after impinging)

제트가 충돌판에서 약간 떨어진 지점에서 발달하는 것으로 판단된다. Fig. 11(b)에서 특징적인 것은 벽면제트가 거의 충돌판에 붙어서 발달하는

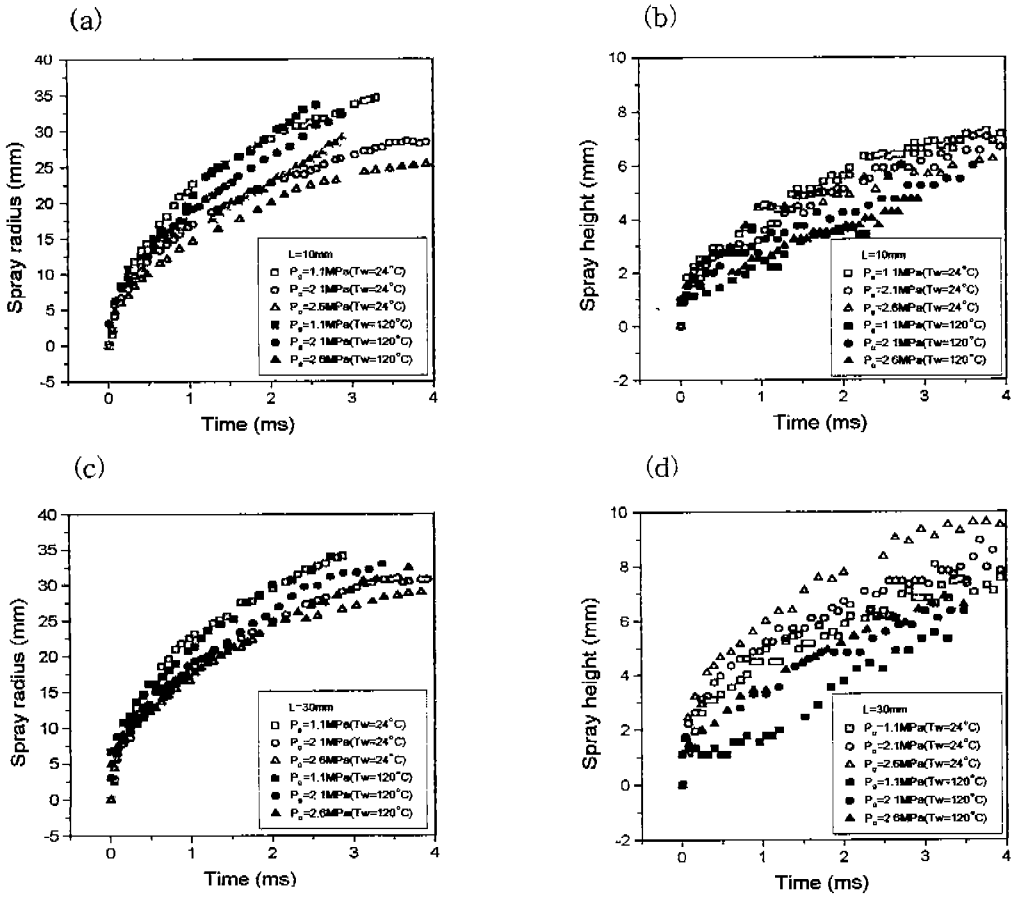


Fig. 12 Effect of ambient pressure on the development of impinging spray into the heated plate ( $T_w=120^\circ\text{C}$ )

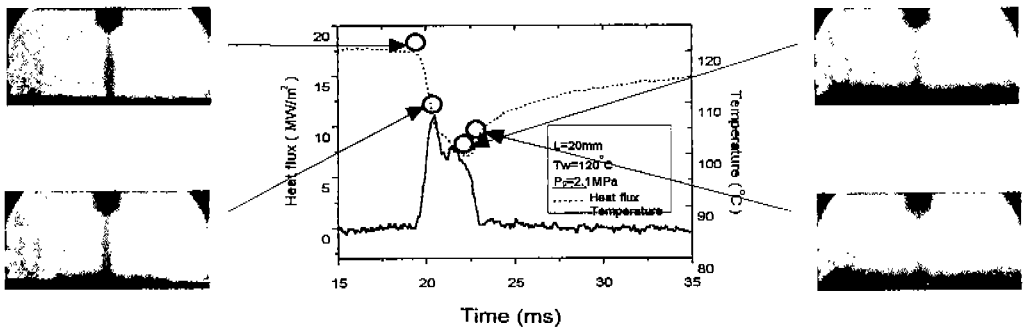


Fig. 13 Comparison of temperature, heat flux and impinging image

것과 저온평판(Fig. 11(a))에서 뚜렷하게 발달했던 정체영역이 상당히 감소했다는 점이다. 고온의 경우에는 저온 평판과 달리 발생하는 액적들의 직경이 작고 정체층의 액막을 형성하는 것 또



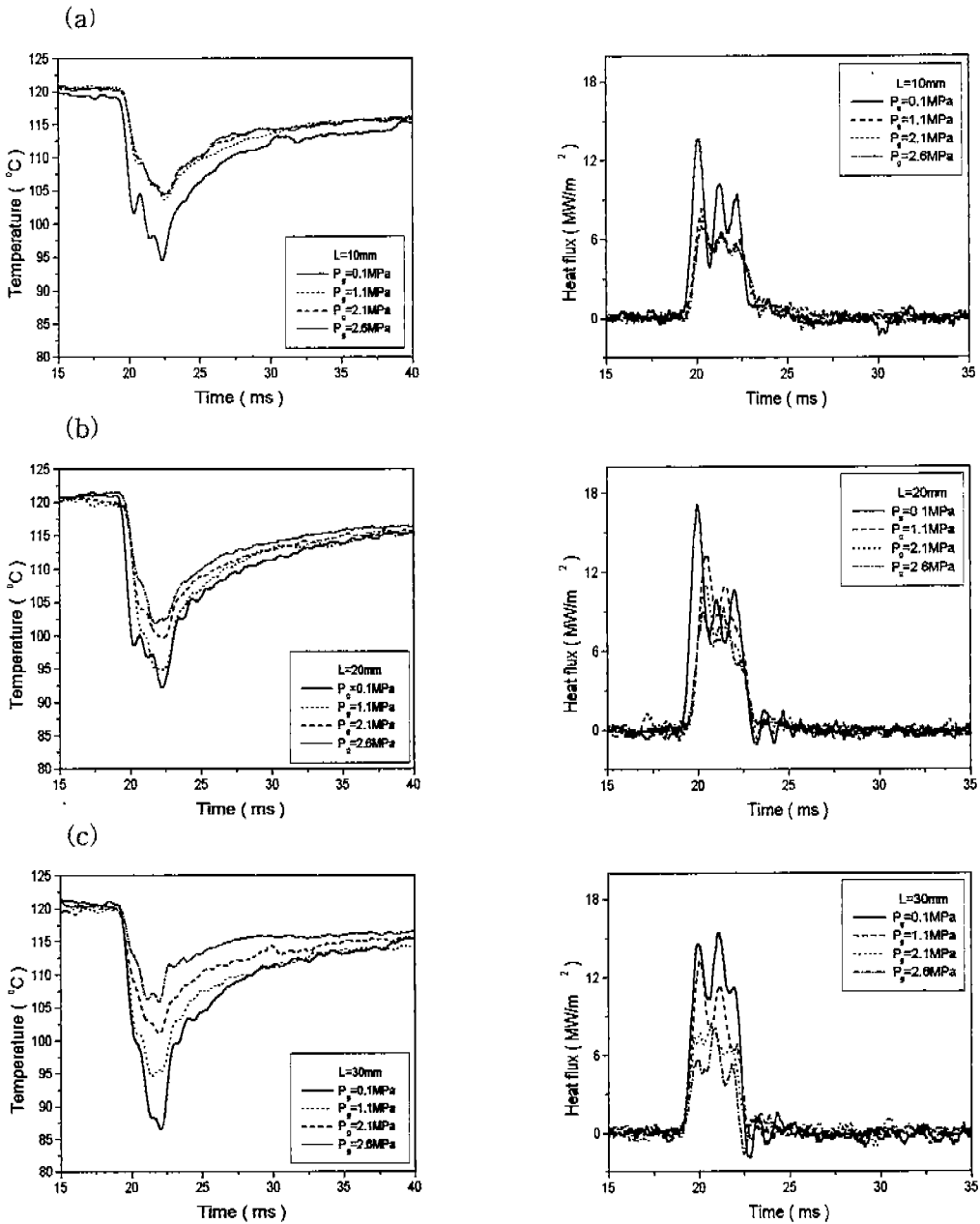


Fig. 14 Variation of temperature and heat flux on the heated plate( $T_w=120^\circ\text{C}$ )

한 미미함을 알 수 있다. 일반적으로 분무는 판에 충돌직후 바로 판을 따라 반경방향으로 발달하고, 이때 속도 또한 상대적으로 크다. 분무 선단에서 주변의 저항에 의해 속도를 잃은 액적들이

벽면제트에 의해 위쪽으로 밀려 올라가면서 정체 영역이 형성되고 고온 충돌판의 경우는 벽면제트가 저온 충돌판보다 상대적으로 아래쪽에 위치하여 분무의 높이가 낮은 것으로 판단된다.

Fig. 13은 분무가 총돌판에 충돌시 판의 온도 변화와 열유속 그리고 그 순간의 분무사진을 나타낸 것이다. 분무가 판에 충돌하기 시작하면서 총돌판 표면의 온도는 약 20-30 °C 정도 급격히 하락하고 열유속 또한 최대치를 나타내는 것을 볼 수 있다. 온도가 최대로 하락하는 지점은 분사 종료 시기와 대체로 일치하며 분사종료 후 남아 있던 분무가 모두 총돌판을 흘러갈 때까지 온도가 거의 일정하게 유지되고 있음을 알 수 있다. 분사가 종료되고 분무의 나머지 부분이 모두 흘러간 후부터 서서히 온도가 회복된다.

Fig. 14는 각각의 L과 분무실 압력에 대해 총돌판 표면의 온도의 변화와 열유속의 변화를 나타낸 것이다. L=10mm(Fig. 14(a))일 경우 대기압을 제외한 나머지 압력에서는 같은 경향을 나타내다가 점차 L이 길어져 L=30mm(Fig. 14(c))일 경우 분무실 압력에 따라 순차적인 경향을 나타내는 것을 볼 수 있다. 분무가 판에 충돌하여 총돌판의 온도가 내려가고 열유속이 증가하는 경향을 보면 전체적으로 충돌 초기에 급격한 하락과 증가를 보이고 있는데 이는 분무가 판에 충돌시 분무의 상태와 밀접한 관련이 있다. Chang은 대기압 상태의 실험 연구[7,8]에서 총돌판의 온도 변화는 분무의 축방향 속도의 함수라고 주장하였다. 분무실 내의 압력이 높아질수록 분무의 속도는 줄어들고 또한 분사각이 커져 측정점에 충돌하는 분무의 밀도가 줄어든다. 또한 각각의 분무실 압력에 따른 분무속도의 상대적인 차이는 Fig. 8에서 보는 바와 같이 노즐과 총돌판 사이의 거리가 증가할수록 커진다. 이로 인해 분무속도의 차이가 별로 없는 L=10mm(Fig. 14(a))에서는 온도변화 및 열유속이 별 차이가 없으나 분무속도의 차이가 크게 나는 L=30mm(Fig. 14(c))에서는 순차적인 경향을 나타내는 것이라 생각된다.

#### 4. 결 론

분무실 내부의 압력과 총돌판의 위치를 변화시

키면서 디젤 총돌 분무의 거동과 총돌판의 열전달 특성을 조사한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

1. 분무가 총돌판에 충돌한 후 총돌판과 가까운 부분에서는 운동량이 큰 벽면제트가 발달하고, 총돌판에서 조금 떨어진 곳에 있는 분무는 상대적으로 운동량이 작아 위로 밀려 올라간다.
2. 분무실내의 압력이 높을수록 반경방향의 발달 길이(R)가 감소한다.
3. 노즐 선단과 총돌판의 길이가 짧은 경우(L=10mm)는 분무실 압력에 따른 총돌분무의 높이의 뚜렷한 차이를 볼 수 없으나 길이가 길어짐에 따라(L=30mm) 압력이 높은 경우가 총돌분무의 높이가 더 크다.
4. 고온 평판에 충돌하는 경우가 저온 평판에 충돌하는 경우보다 반경방향으로 더 큰 발달을 보이고 분무의 높이는 현저하게 감소하였다.
5. 분무노즐과 총돌판 사이의 거리가 증가할수록 각각의 분무실 압력에 따른 총돌판 온도변화 및 열전달의 차이가 뚜렷해졌으며 분무실 압력이 증가할수록 열전달이 감소하였다.

#### 참 고 문 헌

1. Kato, T., Tsujimura, K., Shintani, M., Minami, T., and Yamaguchi, I., "Spray Characteristics and Combustion Improvement of D.I. Diesel Engine with High Pressure Fuel Injection," SAE Paper 890265, 1989.
2. 松井幸雄, "소형 Diesel 기관의 신연소 Concept," 연소연구 Vol. 107, pp.41-51, 1997.
3. H. Takahashi, H. Yanagisawa, S. Shiga, T. Karasawa, H. Nakamura, "Observation of the Atomization Process of an

- Intermittent Spray from a Diesel Nozzle in Its Very Early Stage," 일본기계학회 논문집, 논문 No.94-0898.
4. R. D. Reitz and F. B. Bracco, "On the Dependence of Spray Angle and other Spray parameters on Nozzle Design and Operating Conditions," SAE Paper 790494, 1979.
  5. Naber, J.D. and Reitz, R.D., "Modeling Engine Spray/Wall Impingement," SAE Paper 881316, 1988.
  6. Holman, J.P., "Experimental Methods for Engineers," 6th Ed., McGraw-Hill, New York, 1994.
  7. C. Arcoumanis, J-C. Chang, "Flow and Heat Transfer Characteristics of Impinging Transient Diesel Spray," SAE 940678, 1994.
  8. J-C. Chang, "Diesel Spray Characteristics and Spray/Wall Heat Transfer," Ph. D. Thesis, University of London, London, June 1993.