

다공 노즐에서 분사조건이 디젤 연료의 미립화 특성에 미치는 영향

서현규* · 김지원* · 이창식†

Effect of Injection Condition on the Diesel Fuel Atomization in a Multi-Hole Nozzle

Hyun Kyu Suh, Jee Won Kim and Chang Sik Lee

Key Words: Droplet distributions(액적분포도), Injection rate(분사율), Spray tip penetration(분무도달거리), Sauter mean diameter (SMD)

Abstract

This paper present the diesel fuel spray evolution and atomization performance in a multi-hole nozzle in terms of injection rate, spray evolutions, and mean diameter and velocity of droplets in a compression ignition engine. In order to study the effect of split injection on the diesel fuel spray and atomization characteristic in a multi-hole nozzle, the test nozzle that has two-row small orifice with 0.2 mm interval was used. The time based fuel injection rate characteristics was analyzed from the pressure variation generated in a measuring tube. The spray characteristics of a multi-hole nozzle were visualized and measured by spray visualization system and phase Doppler particle analyzer (PDPA) system. It was revealed that the total injected fuel quantities of split injection are smaller than those of single injection condition. In case of injection rate characteristics, the split injection is a little lower than single injection and the peak value of second injection rate is lower than single injection. The spray velocity of split injection is also lower because of short energizing duration and small injection mass. It can not observe the improvement of droplet atomization due to the split injection, however, it enhances the droplet distributions at the early stage of fuel injection.

기호설명

D	diameter [mm]
L	distance from the nozzle [mm]
P	pressure [MPa]
t	time [ms]
amb	ambient
asoi	after start of injection
eng	energizing
inj	injection

1. 서론

압축착화 기관에서 연료 분무의 미립화는 엔진실린더 내에서 균일 혼합기의 형성에 직접적으로 영향을 미친다. 따라서, 연료 분무 미립화 특성의 향상을 위하여 고압 분사, 분사시기의 조절, 다단분사와 같은 연구들이 활발히 수행되고 있다⁽¹⁻⁴⁾. 기본적으로, 연료 미립화는 분사노즐의 직경에 의해 직접적으로 영향을 받는다. 따라서, 노즐 직경의 감소는 분무 액적의 미립화를 증진시키고, 연소실 내에서 액적의 증발을 촉진한다. 반면에, 노즐 직경의 감소는 연료 분사량의 감소로 인하여 분무도달거리가 짧아지고, 분사시기의 조절 및 균일한 혼합기 형성을 어렵게 하는 단점이 있다.

이러한 단점을 보완하기 위하여, 압축착화 엔진에서 다공 노즐의 적용이 연구되고 있다. 다공 노즐은 하나의

(2009년 1월 23일 접수 ~ 2009년 2월 14일 심사완료)

*한양대학교 대학원 기계공학과

†책임저자, 회원, 한양대학교 기계공학부

E-mail : cslee@hanyang.ac.kr

TEL : (02)2220-0420 FAX : (02)2281-5286

노즐에 작은 직경을 가진 두 개의 노즐이 쌍으로 평행하게 위치하고 있어, 노즐 직径의 감소로 인한 분무 운동량의 감소를 보상하고, 혼합기 형성을 증진시키는데 도움이 된다. 따라서, 압축착화 엔진에서 다공 노즐의 적용에 관하여 많은 연구들이 수행되고 있다.

Zhang⁽⁵⁾등은 다공 노즐의 분무 미립화 특성을 동일한 노즐 면적의 단공 노즐과 비교하여 실험적으로 연구하였고, 다공 노즐이 분무 액적의 미립화를 촉진하고, 운동량을 서로 보충하여 분무 도달거리는 거의 동일하다고 보고하였다. LAS(laser absorption and scattering)법을 이용하여, Sato⁽⁶⁾등은 다양한 형상의 다공 노즐에서 분무 혼합기 형성에 대하여 연구하였다. 또한, Nishida⁽⁷⁾등과 Matsumoto⁽⁸⁾등도 비슷한 연구를 수행하였다. Gao 등⁽⁹⁾은 다공 노즐에서의 연료 분무는 연료 혼합기의 형성과 증발을 촉진한다고 보고하였고, 화염 가시화를 통하여 연소 특성을 분석하였다⁽¹⁰⁾. 또한, 다양한 실험 조건에서 다공노즐의 연료 소비율과 배출물 특성에 대하여 Park 과 Reitz⁽¹¹⁾가 연구를 수행하였고, 다공 노즐의 사용은 ISFC, CO, HC 및 Soot의 배출물 특성을 개선하지만, NOx는 소량 증가한다고 보고하였다.

많은 연구들이 보고한 바와 같이, 다공 노즐의 사용은 노즐 직경 감소로 인한 연료 분무의 운동량 감소를 보상하여 혼합기 형성 및 증발 특성을 개선할 것으로 기대된다. 반면에 다공 노즐의 적용성에 관한 많은 연구들이 활발히 진행되었음에도 불구하고, 연료의 미립화 특성에 대하여서는 아직 많은 연구가 필요한 실정이다.

따라서, 본 연구에서는 압축착화 엔진에서 분사 조건에 따른 다공 노즐의 분무 거동 및 미립화 특성을 분사율 특성의 비교, 분무 발달 과정의 가시화, 액적 크기 및 속도의 측정을 통하여 비교 연구하였다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 실험 장치

다공 노즐에서의 연료 분사 조건이 분무 특성에 미치는 영향을 연구하기 위하여, 본 연구에 사용된 실험용 노즐은 피에조 구동방식이며, Fig. 1과 같이 노즐직경은 0.1 mm이고, 6개의 각도 위치에서 상하 쌍으로 가공한 노즐을 사용하였다. 다공 노즐의 구체적인 제원은 Table 1에 나타내었다.

연료의 분사 특성은 최대 분사율이나 분사 지연 기간에 영향을 받으므로, 다공 노즐의 분사율 특성을 분석하

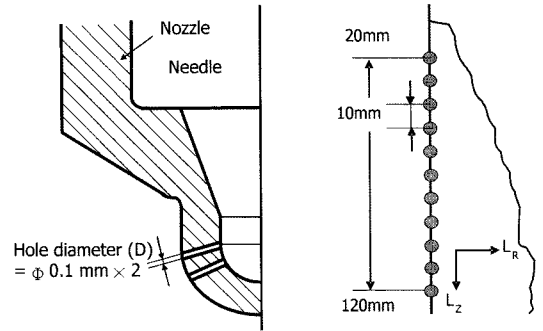


Fig. 1 Test multi-hole nozzle and measuring points

Table 1. Specifications of test nozzle

Nozzle type	Multi-hole
Hole diameter (mm)	0.1
Hole number	6×2
Hole layout (°, deg)	130 (Parallel)
Hydraulic flow (cm ³ /s)	13.5

기 위하여, Bosch⁽¹²⁾가 제안한 분사율 특성 장치를 이용하여 분사조건이 연료 분사량 및 분사율에 미치는 영향을 실험적으로 연구 분석하였다.

분무의 평균 입경(SMD)과 액적의 분사 속도를 측정하기 위한 PDPA 실험의 측정점은 Fig. 1에 나타낸 것과 같이 분무의 중심 축 방향으로 20 mm부터 120 mm까지 10 mm 간격으로 측정 하여 비교 분석하였다.

다만 분사가 다공 노즐의 분무 발달과 미립화 특성에 미치는 영향을 연구하기 위하여, 분무 가시화 장치와 미립화 특성 측정 장치를 Fig. 2와 같이 구성하였다. 분무 가시화를 위한 광원으로는 514.5 nm의 파장을 가진 Ar-ion 레이저(INNOVA 70C, Coherent)를 사용하였고, 고해상도 ICCD 카메라(Dicam Pro, Cooke)를 사용하여, 분무 발달의 과정을 분석하였다. 다공 노즐로부터의 연료 분사 신호의 발생과 제어를 위하여, 인젝터 드라이버(TEMS, TDA-3200H)를 사용하여 실험을 수행하였다. 분무 미립화 특성 측정을 위하여 Ar-ion 레이저, 트랜스미터, 수광부와 데이터 저장 장치로 구성된 위상도플러 입자 분석기(phase Doppler particle analyzer)장치를 구성하여, 분무 액적의 평균 크기와 속도를 비교 측정하였다. 또한, 시간의 변화에 따른 액적의 입경과 속도 측정을 위해, 신호 분석기와 인젝터 드라이버, 디지털 신호 발생기를 동기화 하여 실험하였다.

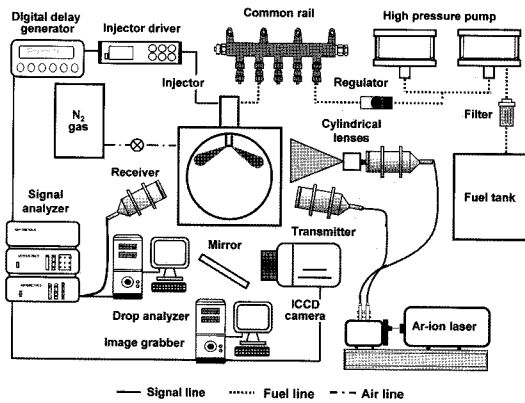


Fig. 2 Schematics of spray visualization and droplet measuring system

2.2 실험 방법

다공 노즐에서 분사 조건이 디젤 연료의 분무 및 미립화 특성에 미치는 영향을 연구하기 위하여 Table 2와 같은 조건에서 실험을 수행하였다. 분사 압력 조건은 100 MPa 의 조건에서 실험을 수행하였으며, 분사 조건의 영향을 분석하기 위하여 단일 분사의 경우 0.6 ms의 통전기간(t_{eng}) 조건에서, 다단 분사의 경우 첫 번째 분사와 두 번째 분사의 통전기간(t_{eng})을 각각 0.3 ms로 고정하였고, 두 번째 분사의 시작은 첫 번째 분사 시작 후 2.0 ms후에 연료 분사가 시작되도록 분사 시기를 조절하였다.

Table 2. Experimental conditions

Injection rate and visualization	Injection pressure (MPa)	100
	Ambient pressure (MPa)	2
	Ambient temperature (K)	297
	Energizing duration (ms)	0.6 0.3-0.3
Droplet measuring	Injection pressure (MPa)	100
	Ambient pressure (MPa)	0.1
	Energizing duration (ms)	0.6 0.3-0.3

분사율과 분무 가시화 실험의 경우, 압축 착화엔진의 연소실 조건을 고려하여 2 MPa의 분위기 압력 조건에서 실험을 수행하였고, 분무 미립화 측정의 경우, 레이저의 산란 정도와 데이터 취득율을 고려하여, 0.1 MPa의 분위기 압력에서 실험을 수행하였다. 실험 데이터는

두개의 레이저 채널이 동시에 취득한 측정치가 30,000 개가 되도록 설정하였으며, 측정 입경의 유효 범위는 2 μm -80 μm 로 설정하였다. 또한, 시간의 변화에 따른 액적의 입경과 속도 측정을 위해, 신호 분석기와 인젝터 드라이버, 디지털 신호 발생기를 동기화하여 실험을 수행하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 다공 노즐의 분사율 특성의 비교

압축 착화 기관에서 단일 분사와 다단 분사 조건이 분사량에 미치는 영향을 측정하여 Fig. 3에 나타내었다. 분사량의 측정을 위하여, 인젝터의 통전기간은 단일 분사의 경우 0.6 ms, 다단 분사의 경우 0.3-0.3 ms로 고정하였으며, 총 200회의 연료를 분사하였다. 실험결과, 단일 분사 조건에 비하여 분사량이 약 14% 정도 감소하는 결과를 보였는데, 이는 다단분사의 경우, 첫번째 연료 분사 후 인젝터 노즐 내의 압력강하가 두번째 연료 분사에 영향을 주어 분사량이 줄어든 것으로 판단된다. 또한, 이러한 결과는 연료의 분사율에도 영향을 미칠 것으로 판단된다.

다공 노즐에서 단일 분사 및 다단 분사가 연료 분사율에 미치는 영향을 비교 연구하여 Fig. 4에 나타내었다. 본 연구에서 분사지연기간 (t_{id})은 인젝터 통전 신호 시작과 분사 시작 사이의 시간 간격으로 정의하였다. 실험 결과 분사 조건에 상관없이 분사지연 기간은 0.22 ms로 나타났다. 다단 분사의 경우, 첫번째 연료 분사와 두번째 연

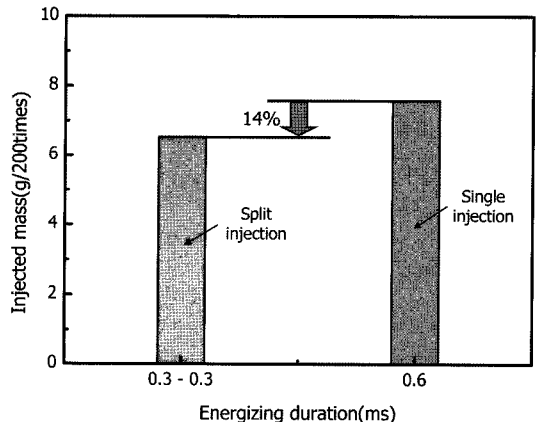


Fig. 3 Injection quantities of single and split injection injected through multi-hole nozzle

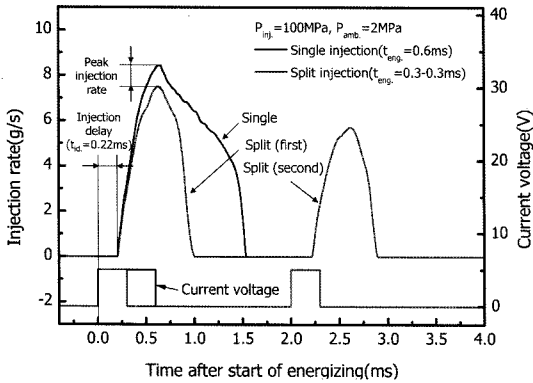


Fig. 4 Injection profiles of single and split injection according to the elapsed time after start of energizing ($P_{inj.}=100$ MPa, $P_{amb.}=2$ MPa)

료 분사의 시간 간격을 2.0 ms로 고정하여, 두번째 연료 분사가 2.22 ms부터 시작되는 것을 확인할 수 있었다. 또한, 다단 분사의 경우, 단일 분사와 비교하여 분사량의 감소로 인해 최대 분사율을 낮게 나타냈으며, 최대 분사율에 도달하는 시간은 통전 신호 시작 후 약 0.63 ms로 동일하였다. 또한, 두번째 연료 분사의 최대 분사율은 분사량 결과에서 예상한 바와 같이 분사 노즐 내의 압력 강하로 인하여 첫번째 연료 분사율 보다 낮았다.

3.2 다공 노즐의 분무 발달 특성의 비교

직접 분사식 압축 착화 엔진에서 분무 발달과정은 연소실내의 분무의 분포 및 혼합기 형성을 결정하는 중요한 인자이다. 따라서, 다공 노즐로부터의 단일 및 다단 분사의 분무 발달과정을 비교 연구하였다.

분사 조건에 따른 분무 발달과정을 분무 가시화장치를 이용하여 Fig. 5와 같이 분사 시작 후 경과 시간 (t_{asol})에 따라 비교하여 나타내었다. 분사 조건에 상관 없이 분사 시작 후 시간의 경과에 따라 연료 분무의 성장을 확인할 수 있었고, 다단 분사의 경우, 두번째 분사 시작 시간을 2.0 ms로 설정하여, 분사 시작 후 2.0 ms 이후에 두번째 분사가 시작되었다. 또한, 단일 분사와 비교하여 짧은 통전기간으로 인하여 연료의 분사 속도가 감소하여 다단 분사의 첫번째, 두번째 분무 발달 속도가 단일분사보다 느린 것으로 나타났다.

분무 가시화 결과로부터, 연료 분사 조건에 따른 분무 도달거리를 측정하여 Fig. 6에 비교 분석하여 나타내었다. 본 연구에서 분무 도달거리는 다공 노즐로부터 분사된 연료가 서로의 간섭으로 인하여 분무 발달과정에 주

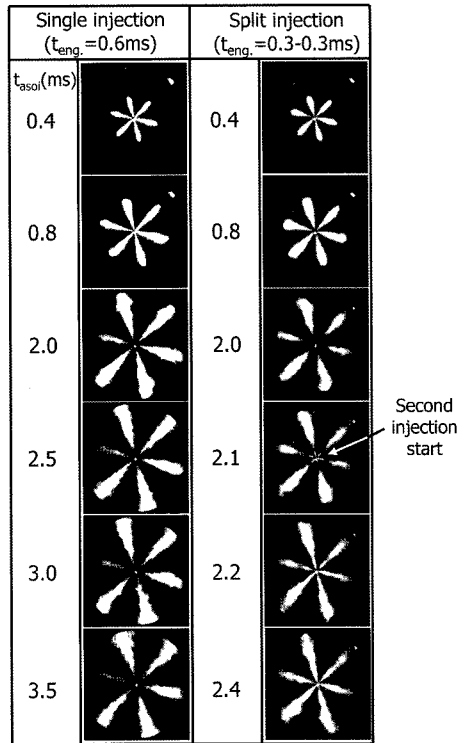


Fig. 5 Comparison of spray evolution process according to the elapsed time after start of injection ($P_{inj.}=100$ MPa, $P_{amb.}=2$ MPa)

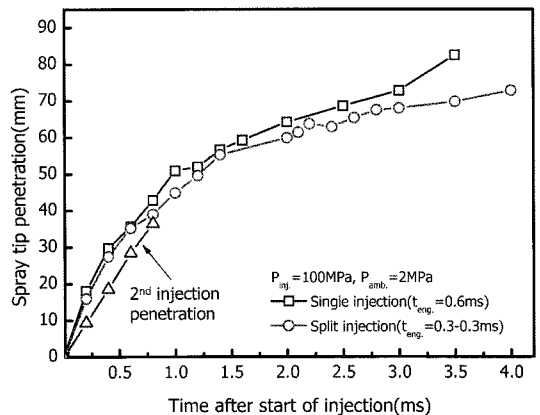


Fig. 6 Comparison of spray tip penetrations according to the elapsed time after start of injection ($P_{inj.}=100$ MPa, $P_{amb.}=2$ MPa)

는 영향을 최소화하기 위하여, 분무가 인젝터 노즐로부터 도달하는 최대의 거리로 정의하였다. 비교 결과, 다단 분사의 분무 도달거리가 단일 분사의 결과와 비교하여 약간은 짧은 것으로 나타났으며, 두번째 분사의 도달

거리가 가장 짧은 것으로 나타났다. 이는, 다단분사의 경우 예상한 바와 같이 첫번째 연료 분사 후 인젝터 노즐 내의 순간적인 압력 강하가 두번째 분사시 연료량과 분사 속도의 감소를 유발하여 나타난 결과로 판단되며, 이러한 결과는 분사량, 분사율 및 분무 가시화 결과에서 유추한 결과와 동일한 경향을 보인다.

3.3 다공 노즐의 미립화 특성의 비교

직접 분사식 압축착화 엔진에서 연료 분무의 미립화 특성은 연소실 내의 분사 액적의 증발 및 연소 특성과 밀접한 관계를 가지고 있다. 따라서, 본 연구에서는 대표적인 분무 미립화 특성인 액적의 평균 입경과 분사 속도 분포를 연료의 분사 조건에 따라 실험적으로 연구하였다.

Figure 7은 분무의 축 방향 거리에 따른 속도의 분포

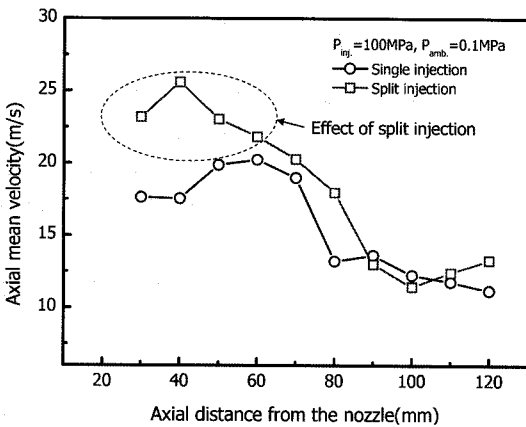


Fig. 7 Axial mean spray velocity distribution in a axial distance from the nozzle ($P_{inj}=100$ MPa, $P_{amb}=0.1$ MPa)

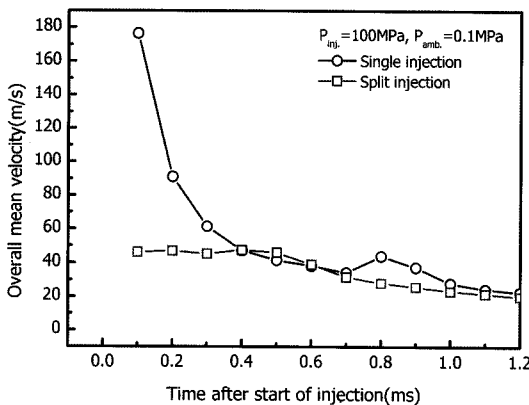


Fig. 8 Overall mean velocity according to the elapsed time after start of injection ($P_{inj}=100$ MPa, $P_{amb}=0.1$ MPa)

를 분사 조건에 따라 비교한 것이다. 다단 분사의 경우, 앞에서 언급한 바와 같이 짧은 통전기간과 작은 분사량으로 인하여 분사 노즐 근처 영역에서는 분사의 속도가 느린 것으로 나타났고, 하류 방향으로 분무가 진행될수록, 단일 분사와의 속도 차이가 감소하였다. 또한, 다단 분사의 분무 노즐 근처에서의 느린 속도는 분사 액적의 운동량과 관련이 있을 것으로 판단된다. 다단 분사시의 작은 운동량은 분무 하류부분에서 액적 분포의 정체를 유발하고, 이러한 분무의 정체 영역의 발생은 연료의 미립화 특성에 영향을 미칠 것으로 사료된다.

Figure 8은 단일 및 다단 분사 조건의 분사 시작 후 경과 시간에 따른 속도의 분포를 비교한 것이다. 단일 분사의 경우 연료 분사 직후 150 m/s 이상의 속도 값을 보인 후 점차 감소하였으나, 다단분사의 경우, 분사 시작 후 시간의 경과에 관계없이 약 40 m/s의 속도 분포를 보였다.

다공 노즐의 분사조건이 축 방향 거리에 따른 분무 액적의 입경 크기에 미치는 영향을 비교하여 Fig. 9에 나타내었다. 비교 결과, SMD의 경우에는 약 40 μ m 부근에서, AMD의 경우에는 약 20 μ m 부근에서 액적의 입경이 분포하는 것으로 나타났으며, 다단 분사에 의한 연료의 미립화 특성 증진 결과는 없는 것으로 판단된다. 또한, 다단 분사의 경우, 축 방향 거리 80 mm 이후 지점부터 SMD와 AMD가 증가하는 경향을 보였다. 기본적으로 연료 분사 후, 축 방향으로 연료 발달이 진행될수록 액적의 운동량 손실이 발생하고, 분무 하류에서 정체하게 되며, 이 영역에서 연료 액적 간의 흡착(coalescence)이 발생한다. Fig. 7의 결과로부터, 다단 분사의 연료 분무 속도는 분사초기에 단일 분사보다 느리고, 액적의 운동량은 작을것으로 예상되었다. 따라서, 분무하류

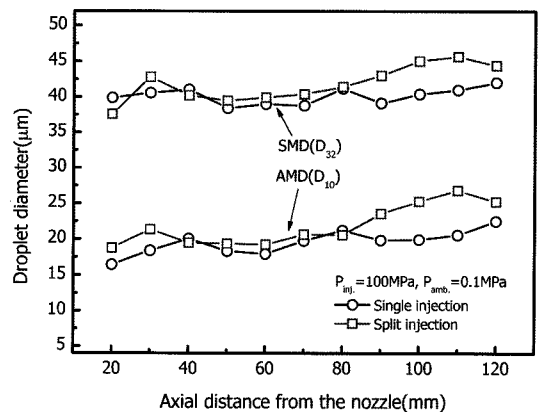


Fig. 9 Spray droplet size distributions in a axial distance from the nozzle ($P_{inj}=100$ MPa, $P_{amb}=0.1$ MPa)

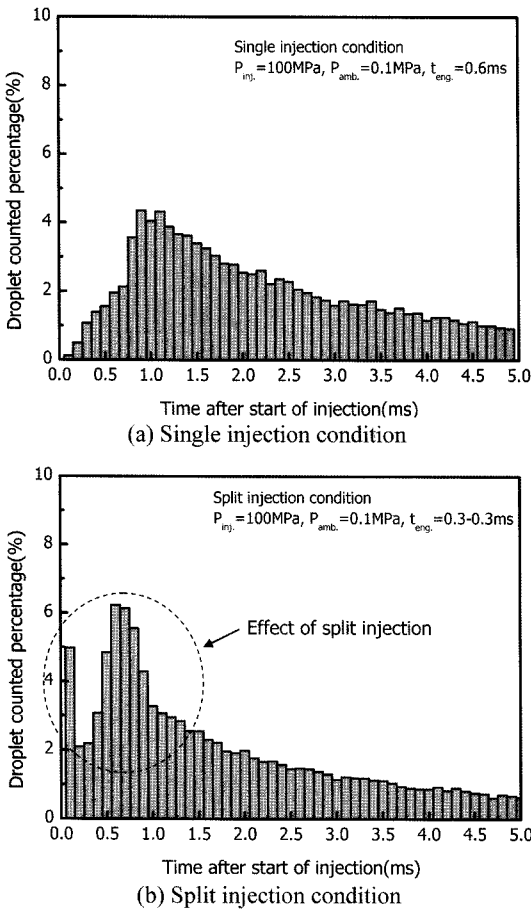


Fig. 10 Counted droplet percentage of both injection conditions according to the elapsed time after start of injection

에서의 액적 간의 흡착 발생 빈도가 단일 분사보다 높아 SMD와 AMD와 같은 평균 입경이 증가하는 것으로 사료된다. 이와 같은 결과로부터, 다공 노즐에서의 다단 분사가 연료의 미립화 특성의 개선에는 큰 영향을 주지 않는다고 판단된다.

다공 노즐에서 다단분사가 분무 미립화 측정 장치의 연료 액적 감지율에 미치는 영향을 분석하기 위하여, Fig. 10과 같이 분사조건에 따른 액적 감지율을 비교하였다. 연료 액적의 감지율은 분사 시작 후 0.1 ms간격으로 분석하였다. 단일 분사의 경우, 분사 시작 후 액적의 감지율이 점차 증가하고, 약 1.0 ms 부근에서 최대 값을 가진 후, 점차 감소하였다. 반면에, 다단 분사의 경우에는 분사시작과 동시에 많은 양의 액적들이 감지된 후, 점차 감소하였다. 즉, 다단 분사의 경우, 앞에서 언급한 바와 같이, 연료의 분사 속도가 느려 분사 초기에 많은

수의 액적들이 분포하고 있는 것으로 판단된다. 이와 같은 결과로부터, 연료의 다단 분사는 분사초기에 액적의 분포를 증진시켜 연소실 내에 농후한 혼합기 형성에 도움이 될 것으로 판단된다.

결론

본 연구에서는 연료 분사 조건이 압축착화 엔진용 다공 노즐의 분무 특성에 미치는 영향을 분사율, 분무 발달 및 분무 미립화 특성의 분석을 통하여 연구하였다. 실험 결과로부터 얻은 결론은 다음과 같다.

1. 동일한 통전 기간 조건에서 다단 분사 조건의 분사량은 첫번째 연료 분사시 노즐 내의 압력강하로 인하여 단일 분사 조건에 비하여 약 14%정도 감소하는 결과를 보였으며, 최고 분사율 값도 단일 분사 조건보다 낮았다. 또한, 두번째 분사의 최고 분사율 값은 첫번째 분사율 값보다 낮았다.

2. 분무 발달과정의 경우, 짧은 통전기간과 분무량의 감소로 인하여 다단 분사 조건의 분무 발달 속도가 단일 분사 조건보다 느렸으며, 분무 도달 거리도 짧은 것으로 나타났다.

3. 다단 분사의 연료 분무 속도는 단일 분사보다 느리고, 액적의 운동량은 작았다. 따라서, 분무 하류에서의 액적 간의 흡착 발생 빈도가 단일 분사보다 높아 SMD와 AMD가 증가하는 것으로 판단된다. 이와 같은 결과로부터, 다공노즐에서의 다단 분사가 연료의 미립화 특성의 개선에는 큰 영향을 주지 않는다고 판단된다.

4. 분사조건에 따른 액적 감지율을 비교한 결과, 단일 분사의 경우, 분사 시작 후 액적의 감지율이 점차 증가하고, 약 1.0 ms 부근에서 최대 값을 가진 후, 점차 감소하였다. 반면에, 다단 분사의 경우에는 분사 시작과 동시에 많은 양의 액적들이 감지된 후, 점차 감소하였다. 즉, 다단 분사의 경우, 연료의 분사 속도가 느려 분사 초기에 많은 수의 액적들이 분포하고 있는 것으로 판단되며, 이와 같은 결과로부터, 연료의 다단 분사는 분사초기에 액적의 분포를 증진시켜 연소실 내에 농후한 혼합기 형성에 도움이 될 것으로 판단된다.

후기

본 연구는 2008년 정부재원으로 한국 학술진흥재단

의 지원(KRF-2008-314-D00056)을 받아 진행되었으며, 연구를 지원해 주신 기관에 감사 드립니다.

참고문헌

- (1) S. W. Park and C. S. Lee, Macroscopic Structure and Atomization Characteristics of High-Speed Diesel Spray, *International Journal of Automotive Technology*, Vol. 4, 2003, pp. 157-164.
- (2) S. E. Gupta, R. Sekar and R. Poola, Effect of Injection Parameter on Diesel Spray Characteristics, *SAE Tech. paper series*, 2000, 2000-01-1600.
- (3) T. Tanaka, Ando, A. and Ishizaka, K., Study on Pilot Injection of DI Diesel Engine using Common-Rail Injection System, *JSAE*, Vol. 23, 2002, 297-302.
- (4) C. S. Lee, K. H. Lee, Reitz, R. D. and S. W. Park, Effect of Split Injection on the Macroscopic Development and Atomization Characteristics of a Diesel Spray Injected Through a Common-Rail System, *Atomization and Sprays*, Vol. 16, 2006, pp. 543-562.
- (5) Y. Zhang, K. Nishida, S. Nomura and T. Ito, Spray Characteristics of Group-hole Nozzle for D.I. Diesel Engine, *SAE Tech. paper series*, 2003, 2003-01-3115.
- (6) K. Sato, J. Kanzaki, M. Yamakawa and K. Nishida, Effects of Hole Geometry and Its Internal Flow on Spray and Mixture Properties of Hole-Type Injectors for a DISI engine, *Proceedings of ICLASS-2006, ICLASS06-166*, 2006.
- (7) K. Nishida, S. Nomura and Y. Matsumoto, Spray and Mixture Properties of Group-Hole Nozzle for D.I. Diesel Engines, *Proceedings of ICLASS-2006, 2006 ICLASS06-171*.
- (8) Y. Matsumoto, J. Gao, M. Namba and K. Nishida 2007, Mixture Formation and Combustion Processes of Multi-Hole Nozzle with Micro Orifices for D.I. Diesel Engines, *SAE Tech. paper series*, 07FFL-102.
- (9) J. Gao, Y. Matsumoto and K. Nishida, Inclusive Data on Evaporating Fuel Spray Injected by Hole-Type D.I. Diesel Injector, *Proceedings of ICLASS-2006, ICLASS06-173*, 2006.
- (10) J. Gao, Y. Matsumoto, M. Namba and K. Nishida, Group-Hole Nozzle Effect on Mixture Formation and In-cylinder Combustion Processes in Direct-Injection Diesel Engines, *SAE Tech. paper series*, 07FFL-98, 2007.
- (11) S. W. Park and R. D. Reitz, Modeling the Effect of Injector Nozzle-Hole Layout on Diesel Engine Fuel Consumption and Emissions, *Proceedings of JRCICE2007, JRCICE2007-40022*, 2007.
- (12) W. Bosch, The Fuel Rate Indicator : A New Measurement Instrument for Display of the Characteristics of Individual Injection, *SAE Tech. Paper*, 660749, 1966.