

이중선회 분무간의 상호작용에 관한 실험적 연구

김형준*, 박병성*, 김호영**, 정진택**

The Experimental Study on the Interaction of Dual Orifice Type Swirl Injectors

H.J. Kim, B.S. Park, H.Y. Kim, and J.T. Chung

Key Words : Swirl Injector, SMD, Spray Interaction

Abstract

The effects of injection pressure and the distance between injectors on the droplet distribution characteristics of liquid spray for dual orifice type swirl injectors were experimentally investigated. The SMD distributions, volume concentration and Rosin-Rammler variation N of liquid spray droplets for water and a fuel were measured by using the laser diffraction particle sizer.

The results of present study show that SMD decreases and spray angle increases as the injection pressure increases. The interaction of sprays from two injectors gives more uniform SMD distribution in the radial direction. As the distance between two injectors increases, SMD that is measured in the interacting region increases. The effect of viscosity on the droplet distribution in the interacting region is greater than the that of surface tension of liquid.

1. 서론

현재 대부분의 동력기관들은 액체 연료를 사용하며 그 화학에너지를 연소과정을 통하여 기계적 에너지로 변환시킨다. 이중 액체연료를 사용하는 연소기는 크게 3부분으로 구성되는데, 이는 연료를 연소기로 공급하는 분무기, 연료와 산화제를 점화시키는 점화기, 그리고 실질적으로 연소

가 일어나는 연소실이다. 이 때 안정적인 연소와 연소효율에 지배적인 영향을 미치는 것이 분무기의 분무특성이다.

2-유체 와류형 분무기는 주위의 공기를 유입하여 오리피스로부터 분사되는 연료와 충돌시켜 미립화를 촉진시키는 방식으로 오리피스는 초기 시동시나 적은 유량을 제어할 수 있는 보조(pilot)분사와 비교적 많은 유량을 제어하는 주(main)분사로 구성되어 있다⁽⁵⁾.

다중분무는 단일분무에서와는 다르게 분무기의 분무가 중첩되는 부분에서 단일분무와는 다른 분무특성을 나타내므로, 본 연구는 분무간의 상호작용을 규명하기

* 고려대학교 대학원 기계공학과

** 고려대학교 기계공학과

위한 연구로서 물(water)과 현재 사용되고 있는 kerosene계 항공유(이하, fuel)를 이용하여 실험을 수행하였다. 공기-연료의 2-유체 분사 와류형 분무기(dual orifice type swirl injector)에서 공기를 공급하는 부분을 제외한 액체연료를 분무하는 와류형 분무기만의 분무특성을 연구하였다. 단일 분무기의 분무 특성과 두 개의 분무기 사이의 간격 변화에 따른 분무특성을 파악하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

Fig. 1은 실험장치의 개략도이다. 실험 유체는 진공펌프를 이용하여 35기압까지 가압할 수 있는 고압용 스테인리스 탱크에 공급된다. 질소가압에 의하여 연료가 분무기로 공급되며, 압력 조정기를 사용하여 압력을 조정한다. 유량은 탱크와 분무기 사이에 설치된 로터미터를 이용하여 측정하였고, 연료공급라인에 압력변환기를 이용하여 분사압력을 측정하여 유량을 확인하였다.

두 개의 분무기의 분무상태 측정에서 분무기 사이의 간격을 변화시킬 수 있는 분무기 간격조절 치구를 제작하여 거리에 따른 분무특성을 측정하였다.

본 실험에서 사용한 입경분석장치는 Malvern Particle Sizer로서 He-Ne 레이저를 사용하며, 빔의 회절(diffraction)을 이용하여 입자의 크기를 측정한다. 레이저 빔을 방출하는 광원과 액적의 크기를 감지하는 광학측정장치, 신호를 전달받아 결과를 분석하는 처리장치(PC)로 구성되어 있다⁽⁶⁾.

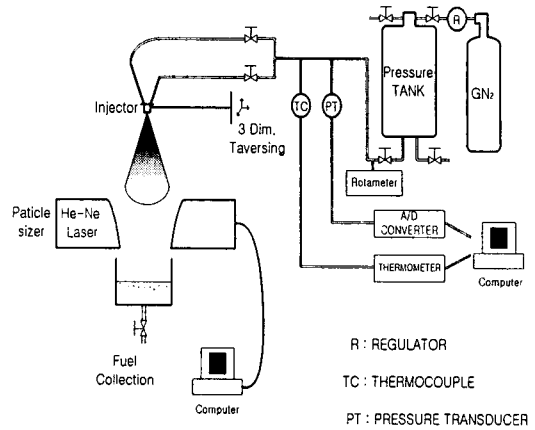


Fig. 1 The schematic diagram of Fuel Injection equipment

2.2 실험조건 및 관련이론

본 실험은 상온의 대기압 하에서 수행하였으며, 연료는 물과 kerosene계 항공유(fuel)로 각 연료의 물성치는 Table 1과 같다.

본 실험에서는 액체의 분무특성 중 SMD와 Rosin-Rammler 변수 N을 측정하였다. SMD는 다음과 같은 정의식으로 표현된다.

$$SMD = D_{32} = \frac{\sum D^3 dn}{\sum D^2 dn} \quad (1)$$

SMD는 체적과 표면적의 비를 나타내기 때문에 체적당 표면적이 넓을수록 즉 SMD가 작을수록 주위 공기와의 열전달이

Table 1. The properties of Water, Fuel at 20°C

	Water	Fuel
Density (Kg/m ³)	998	808
Kinematic Viscosity (mm ² /s)	1.007	1.625
Surface tension (mN/m)	73.6	23.3

용이해지며 또한 단위 분사량당 주위 공기와 접하는 면적이 크기 때문에 증발이 원활하게 되어 연소율이 증대된다⁽¹⁾.

분포특성 분석을 위하여 측정하기 어려운 아주 작은 크기의 액적들을 잘 예측할 수 있는 Rosin-Rammler 모델을 도입하였으며 정의식은 다음과 같다.

$$R = 1 - \nu = \exp \left[- \left(\frac{D}{X} \right)^N \right] \quad (2)$$

여기서 R은 직경이 D보다 큰 액적들의 누적체적분율이며 X, N은 분포형태를 가장 잘 설명해 주는 분포 매개변수이다. X는 누적체적분율이 36.79 % 가 되는 특성 평균직경을 나타내며 분포변수 N은 분무액적 크기분포의 폭을 나타내는데 무한대가 되면 R이 단위 값을 가짐으로써 값이 커질수록 상대적으로 좁은 분포특성을 보인다^(1,2).

2.3. 실험방법

2.3.1 단일(Uni-element)분무기의 분무

분무기의 압력과 측정위치 변화에 따른 SMD와 Rosin-Rammler 매개변수 N을 측정하였다. 보조노즐의 경우 압력을 8, 12, 14 kg/cm²로 변화시켜가며 측정하였고, 주노즐의 경우 압력을 5, 6 kg/cm²로 변화시켜가며 측정하였다. 분무기로부터 분무하류방향으로 3, 6, 9cm로 변화시키며 측정하였다.

2.3.2 두 개의 분무기(Multi-element)사이 간격 변화에 따른 분무

2개의 분무기에 대해 각각 단일분무의 경우 측정데이터를 확보한 후, 두 분무기 사이 간격을 변화시켜가며, 측정위치 변화에 따른 SMD과 Rosin-Rammler 매개변수 N을 측정하였다. 압력은 5kg/cm²로 고정하였고, 이는 실제 엔진이 운전될 때 주(main)노즐의 분무

가 5 kg/cm²부근에서 작동하기 때문이다. 두 분무기 사이 거리는 5cm, 7cm, 9cm로 변화시키며 SMD를 측정하였고, 중심부로부터 외곽으로 반경방향의 액적분포를 분무하류방향 6cm에서 측정하였다.

두 분무기 간격변화에 따른 상호작용을 연구함에 있어서 보조노즐은 영향을 미치지 않으므로 보조노즐은 분무시키지 않고, 주 노즐만을 분무시켜가며 상호작용을 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 단일분무기(Uni-element)의 분무

3.1.1 연료로 물을 사용했을 경우

보조(pilot)노즐의 분무

분무액체로 물을 사용하고, 압력을 8, 12, 14 kg/cm²으로 변화시키며 실험을 하였을 때 다음과 같은 결과를 얻었다.

Fig. 2에서 보면, 분무중심에서 반경방향으로 거리가 증가할수록 SMD가 증가하다가 5cm 가량 떨어진 거리에서 최대값을 갖고 다시 감소한다. SMD가 최대가 되는 위치는 주유동(main stream)을 나타내며, 이는 본 실험에 사용된 분무기가 hollow

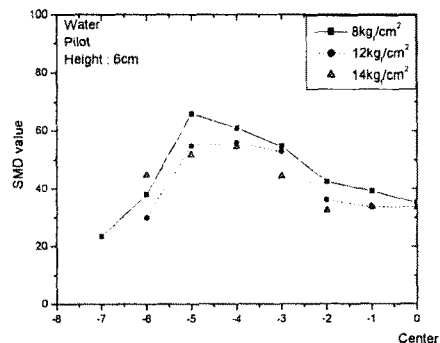


Fig. 2 distribution of SMD at 6cm using pilot nozzle (water)

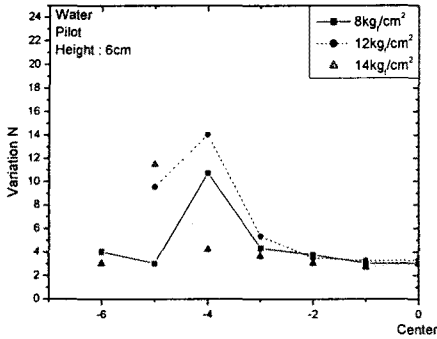


Fig. 3 distribution of variation N at 6cm using pilot nozzle(water) cone type이기 때문에 주유동 영역에서는 수밀도(number density)가 높기 때문이다. 또한, 압력이 증가함에 따라 SMD가 감소함을 볼 수 있다. 이는 압력이 증가함에 따라 액적의 속도가 증가하여 분열이 촉진되는 것으로, 박 등⁽³⁾의 연구결과와 잘 일치하고 있다.

Fig. 3은 Rosin-Rammler 분포함수의 분포계수를 나타낸다. 분무중심에서 반경 방향으로 거리가 증가할수록 N값은 비교적 일정한 값을 나타내다가 주유동 영역에서 급격히 상승한다. 이는 주유동 영역의 액적 입경이 비교적 일정함과 그 밖의 영역에서는 액적 입경의 편차가 큰 것을 의미한다. 그러므로 주유동 영역에서는 입경이 크지만 일정한 액적들이 분포하고, 그 밖의 영역에서는 2차 미립화에 의한 작은 액적과 큰 액적들이 공존하는 것으로 사료된다.

주(Main)노즐의 분무

분무액체로 물을 사용하고, 압력을 5, 6 kg/cm²으로 변화시키며 실험을 하였을 때 다음과 같은 결과를 얻었다.

Fig. 4에서 보면, 보조(pilot)노즐에서와 동일하게 압력증가에 따라 SMD가 감소한

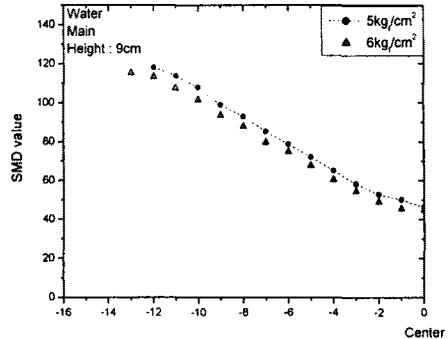


Fig. 4 distribution of SMD at 9cm using main nozzle(water)

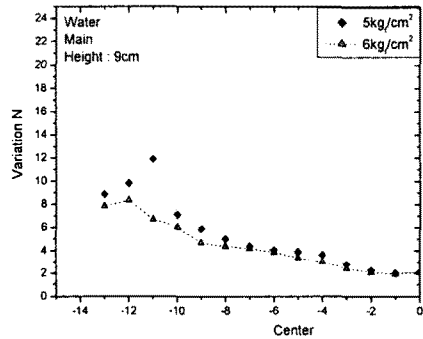


Fig. 5 distribution of variation N at 9cm using main nozzle(water)

다. Fig. 5는 Rosin-Rammler 변수 N을 나타내며 압력이 증가할수록 최대값이 작아지는데, 액적 분열이 더욱 촉진되어 액적 입경의 편차가 커지기 때문이다. Fig. 6과 7은 분무기 면으로부터 수직거리 6, 9cm에서 측정된 SMD와 N을 나타낸다. 수직거리가 증가할수록, 즉 액적이 하류로 내려갈수록 SMD가 감소한다. 또한 N의 최대값이 감소하며, N값이 완만하게 상승한다. 이는 중심 부근에서는 변화가 거의 없지만 주유동 부근에서는 액적 분열이 활발하게 일어나는 것을 의미한다.

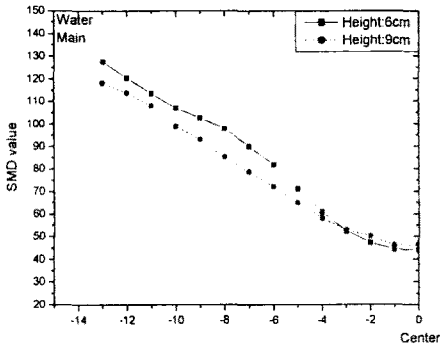


Fig. 6 distribution of SMD at $5\text{Kg}_f/\text{cm}^2$ using main nozzle(water)

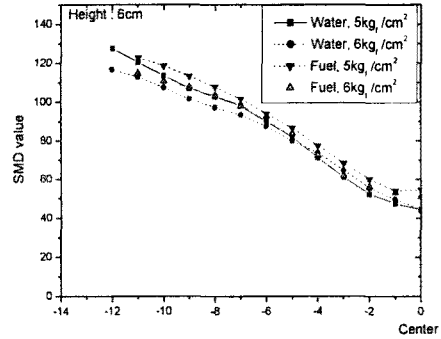


Fig. 8 distribution of SMD at $5\text{Kg}_f/\text{cm}^2$ using main nozzle(water and fuel)

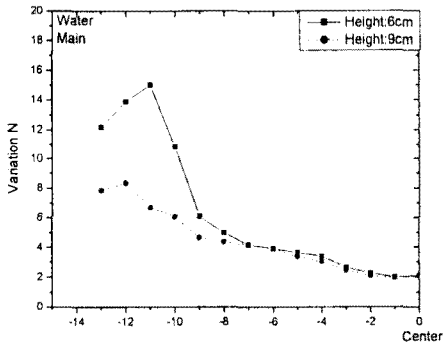


Fig. 7 distribution of variation N at $5\text{Kg}_f/\text{cm}^2$ using main nozzle(water)

고려하면 SMD가 커져야 하고 표면장력에 의한 영향을 고려하면 액적의 크기가 작아져야 한다. 결국 이 두 개의 물성치 차이중 표면장력이 SMD에 미치는 영향보다는 점도가 미치는 영향이 우월하여 연료의 SMD가 물의 SMD에 비해 전체적으로 큰 것으로 생각된다. 또한 압력이 증가하면 전체적인 SMD의 크기가 작아진다. 이는 압력이 증가하면 더 큰 상대속도차에 의해 액체의 미립화가 촉진되는 것으로 사료된다.

3.1.2 연료를 사용했을 경우

Fig. 8은 압력이 5, 6 Kg_f/cm^2 일 때 물과 연료의 SMD를 비교한 것이다. 물과 연료의 분포양상은 비슷하지만 반경방향으로 각 위치에서 SMD의 크기를 비교해보면 물의 SMD에 비해 연료의 SMD가 약간씩 큰 것을 볼 수 있다. 일반적으로 표면장력이 크면 웨버(Weber)⁽¹⁾수가 작아지므로 액적의 분열이 어렵고, 점도⁽⁴⁾가 커져도 분열이 어려운데 Table2에 제시된 것처럼 연료는 물에 비해 점성이 크고 표면장력이 작으므로 점성에 의한 영향을

3.2 두 개(Multi-element)의 분무기 사이 간격변화에 따른 분무

3.2.1 분무액체로 물을 사용했을 경우

Fig 9는 하류방향 6cm에서 두 분무 사이의 거리를 5cm, 7cm 9cm로 달리하여 주노즐을 동시에 분무시켰을 때의 SMD를 비교, 도시한 것이다. 분무기를 하나만 분무했을 때와는 달리 SMD가 전체적으로 매우 균일한 것을 확인할 수 있는데 두 분무기에서 분무되어 나온 액적들의 왕성한 상호작용으로 인해 단일분무와 비교하여 충돌면에서는 액적들간의 합침현상이

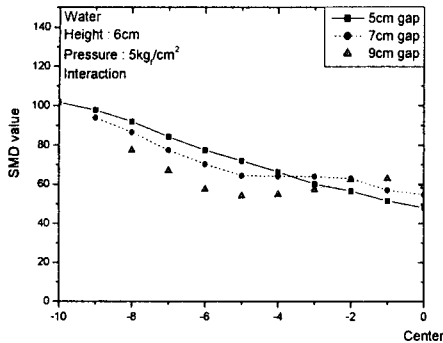


Fig. 9 distribution of SMD at 6cm by interaction(water)

촉진되고 충돌면에서 반경방향으로 멀어질수록 분열이 촉진되는 것으로 생각된다. 분무기 사이의 간격이 상대적으로 가까우면 충돌중심의 SMD는 분무기 사이의 간격이 클 때보다 커지는데, 분무기 사이의 간격이 작으면 상대속도가 큰, 즉 운동량이 큰 액적들이 충돌하므로 분열이 합침 현상보다 우월하고 분무기 사이의 간격이 크면 충돌중심에서 분열이 약해지거나 또는 액적간 합침이 발생하는 것으로 생각할 수 있다. 또한 두 분무기 사이 간격, 즉 gap= 5cm일 경우 중심에서 좌우로 즉 반경방향으로 갈수록 SMD는 점차 커지며 분무기를 하나만 분무했을 때와 비슷한 양상을 보이지만 분무기 사이 거리 즉 gap=9cm일 때는 반경방향 위치 5cm에서 각 분무기의 중심을 보여주는 SMD의 최소값이 나타난다.

3.2.2 연료를 사용하였을 경우

Fig. 10, Fig. 11 그리고 Fig. 12는 물과 연료의 SMD 분포를 분무기 사이 간격이 5cm, 7cm 그리고 9cm일 때 각각 비교하여 도시한 것이다. Fig. 10에서 볼 수 있

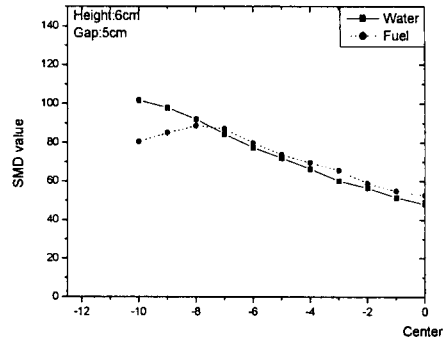


Fig. 10 distribution of SMD at gap=5cm by interaction(water and fuel)

듯이 gap=5cm일 때는 물과 연료의 SMD의 차이가 작아 거의 같은 분포를 갖다고 볼 수 있다. 이것은 물과 연료의 물성치 차이에 관계없이 큰 운동량을 가진 액적들이 충돌하기 때문에 충돌중심에서는 분열이 발생하고 충돌중심에서 반경방향으로 갈수록 액적이 커지는 것을 보여준다. 반면 Fig. 11과 Fig. 12에서는 연료의 SMD가 물의 SMD에 비해 충돌중심부근에서 점차 커지는 것을 알 수 있다. 이는 운동량이 감소하므로 액적간의 흡착이 증가하기 때문으로 사료된다. 표면장력이나 점성은 액체 분열에 저항력으로 작용한다. 그러므로 표면장력이 작거나 점성이 작으면 분열이 촉진되며, 두 값이 커지면 흡착이 촉진된다. 연료의 경우 물보다 표면장력이 작아 분열이 촉진되어야 하지만 점성이 물보다 커서 충돌중심에서 물의 SMD보다 큰 값을 갖는다. 즉 gap이 증가하여 속도가 작은 즉 운동량이 작은 액적들이 충돌할 때, 연료액적의 SMD에 비교하여 물의 SMD보다 큰 것으로 보아 충돌 후 SMD는 표면장력보다 액체의 점도에 더 큰 영향을 받는 것으로 사료된다.

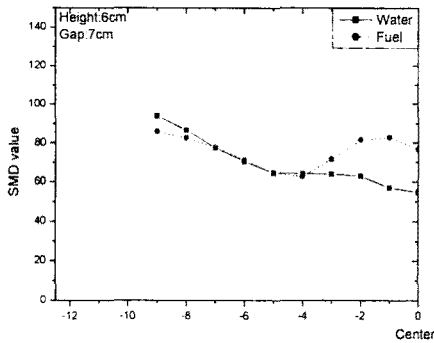


Fig. 11 distribution of SMD at gap=7cm by interaction(water and fuel)

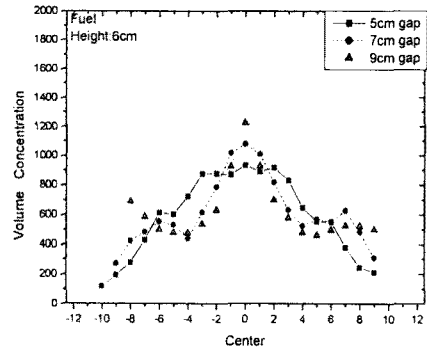


Fig. 13 distribution of Vol. concentration by interaction(fuel)

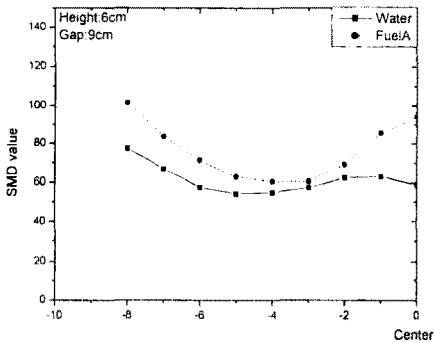


Fig. 12 distribution of SMD at gap=9cm by interaction(water and fuel)

Fig. 13은 연료를 이용하여 분무하였을 때, 분무기 사이 간격 변화에 대한 체적농도를 나타낸다. gap=5cm일 경우 액적들의 운동량이 크기 때문에 침투깊이가 커지며, 액적간 충돌 후 비교적 넓은 범위에 걸쳐 분산이 이루어진다. 분무기 사이 거리가 증가할수록 운동량이 감소함에 따라 침투 깊이가 작아지고, 액적간 흡착이 증가하게 되며, 좁은 영역에 분포하게 된다. 이는 앞의 SMD 결과와 잘 일치하고 있다.

4. 결론

본 실험의 조건과 범위 내에서 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. 단일 분무기에서 분사 압력이 증가하면 SMD는 작아지고 분사각이 커진다. 또한 압력이 높아질수록 SMD와 체적농도는 분무 외곽에서 커지며 분무중심과 주유동 이전의 영역에서는 다양한 크기의 많은 액적들이 존재하고, 주유동영역에서는 균일한 크기의 액적들이 존재한다.
2. 연료의 점도가 물보다 크기 때문에 연료를 분무했을 경우 물을 분무했을 때 보다 SMD가 크다
3. 두 개의 분무기를 동시에 분무했을 때 액적의 평균직경은 반경방향으로 균일하게 분포하며, 두 분무기 사이의 간격이 멀어질수록 충돌영역에서 액적의 크기가 커진다.
4. 두 개의 분무기를 동시에 분무했을 때 충돌중심에서 액적의 크기는 분무액체의 표면장력보다는 액체의 점성에 의해 더 큰 영향을 받는다.

5. 참고문헌

1. 김호영, “연소이론,” 아카넷, 2000.
2. 강일만, “흡기 포트 내 분무액적의 거동 및 액막유량에 관한 실험적 연구”, 석사학위논문, 고려대학교 대학원, 1997.
3. 박병성, “Swirl 인젝터의 분무특성에 관한 연구”, 석사학위논문, 충남대학교 대학원, 1997.
4. Atomization and Sprays, Vol. 10, pp. 475-510, 2000.
5. A. H. Lefebvre, “Atomization and sprays”, Taylor & Francis, 1989.
6. “Malvern Instruction Manual”, Malvern Instruments Ltd.