

이중 선회 분무간의 상호작용에 관한 연구

박병성* · 이동조* · 김호영**

The Study of the Interaction between Dual Spray by Two Swirl Injectors

B. S. Park, D. J. Lee and H. Y. Kim

ABSTRACT

Experimental investigation of the interaction between dual spray formed by swirl type injector was conducted. Experimental parameter was fuel temperature, varied in the range from -20°C to 120°C . Measuring parameter were vertical distance from injector tip to patternator and gap between injectors. Volumetric distribution and SMD were measured for the various combination of parameters.

The results of present study show that the arithmetic sum of each of spray is not equal to dual spray, but it is equal above specific fuel temperature. As the increases of fuel temperature, SMD decreases and becomes more uniform. As the increases of gap between injectors, fuel volume and SMD at collision area increases, but penetrated fuel decreases.

Key Words : swirl injector(와류형 주입기), SMD(Sauter Mean Diameter), atomization(미립화), volumetric distribution(체적분포), relative span factor(상대적 분포구간 지수).

1. 서론

1990년대에 들어서면서 세계 각국은 환경에 대한 관심이 고조되었고, 이제 연소효율과 함께 환경오염을 줄이기 위한 연구가 꾸준히 이루어지고 있는 실정이다. 이로 인하여 분무기의 설계에 있어서 성능향상과 함께 특정 액적의 크기, 속도 및 분포를 갖도록 분무를 제어하는 것이 점차 부각되고 있다.[1,2]

인젝터 단일 분무와는 다르게 두 개의 분무가 중첩되는 영역에서는 주위 공기 유동이 변화할 뿐만 아니라 서로 다른 인젝터로부터 분사된 액적들간의 충돌 및 합착이 활발하게 진행되기 때

문에 액적들의 속도, 크기 및 분포가 상이한 결과를 나타낸다. 그러므로 제한된 영역에서 여러 개의 인젝터를 사용하는 경우, 분무간 중첩되는 영역에서의 분무특성을 파악하는 것은 매우 중요하다.[3]

Adams et al.은 각각 59 micron의 SMD를 갖는 두 개의 와류노즐을 이용하여 물을 공기중으로 분무했을 때, 두 분무의 충돌영역에서 SMD가 단독 분무의 경우보다 크게 나타났다고 보고하였다.[4]

Crosby는 위와 같은 결과의 주 원인을 액적이 충돌하는 지역, 즉 분무가 중첩되는 지점에서 액적들의 충돌에 의한 합착(Coalescence)현상 때문이라고 보고하였다.[5]

정 등은 와류노즐을 이용한 이중분무의 액적속도와 액적크기를 측정하였다.[6]

지금까지의 연구는 대부분이 단일 분무특성을 규명하는데 중점이 맞춰져 있었으며, 분무가 중첩되는 영역에 대한 연구는 미진하다.[7]

* 고려대학교 대학원 기계공학과

† E-mail : poet0921@hanmail.net

** 고려대학교 기계공학과

따라서, 본 연구에서는 와류형 분무기간 거리를 변화시켜가며 분무를 충돌시켰을 때, 분무특성 변화를 알아보았다. 특히 온도를 변화시켜가며, 물성치 변화로 인하여 나타나는 현상을 중점적으로 연구하였다.

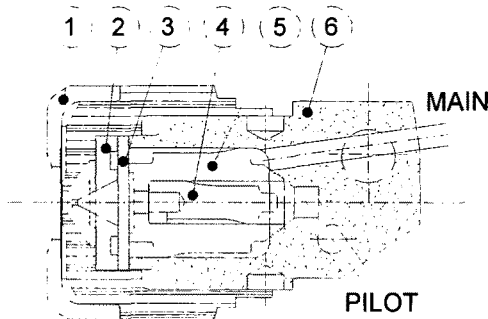
2. 실험장치 및 방법

2.1 인젝터와 연료

Figure 1은 본 연구에 사용된 dual orifice type swirl injector의 도면을 나타낸 것이다.

본 인젝터는 가스터빈에 사용되는 인젝터로서 보조(pilot) 노즐과 주(main) 노즐로 구성된다. 보조 노즐은 점화나 저유량 연소시 단독으로 사용되고, 정상 연소시에는 비교적 많은 유량을 제어하는 주 노즐과 보조 노즐이 동시에 사용된다.

본 연구에서는 보조 노즐과 주 노즐이 동시에 분무될 때, 두 개의 인젝터로부터 분사되는 분무간 상호작용을 체적분포와 크기분포를 측정하여 분석한다.



- ① nozzle main
- ② nozzle pilot
- ③ swirler pilot
- ④ filter pilot
- ⑤ filter main
- ⑥ case & tube

Figure 1. The schematic diagram of dual orifice type swirl injector

본 연구에 사용된 연료는 등유(kerosine)계열의 연료로서 현재 가스터빈에 사용되고 있다. 연료의 물성치는 Table 1과 같다.

Table 1. The properties of fuel

Temperature (°C)	-20	0	20
Density (kg/m^3)	845.17	830.18	814.20
Kinematic Viscosity (mm^2/s)	4.3	2.5	1.63
Surface Tension ($mN/m \times 10^4$)	26.4	24.9	23.3

2.2 연료공급장치

Figure 2는 실험장치의 개략도이다. 연료는 진공펌프를 이용하여 필터를 거쳐서 고압용 스테인레스 탱크에 공급된다. 압력조정기를 통과하는 질소 가스를 이용하여 연료를 가압하며, 연료탱크에 장착된 압력계에 의해 탱크압력을 확인할 수 있다. 질소에 의해 가압된 연료는 배관을 통하여 열교환기로 공급된다. 연료는 $-45^{\circ}C \sim 250^{\circ}C$ 로 온도를 조절할 수 있는 고온/저온 항온조에 장착된 열교환기를 거쳐 분무기로 공급된다. 이때, 분무기로 연료를 공급하는 관에 압력변환기와 열전대를 장착하여 분사압력과 분사연료의 온도를 측정한다.

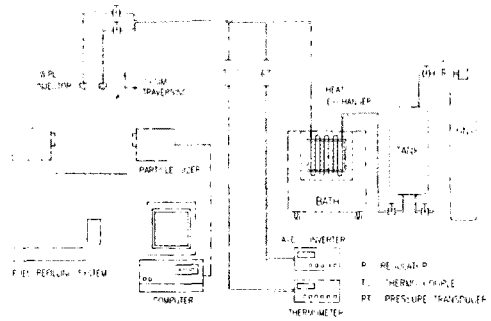


Figure 2. The schematic diagram of fuel supply system.

2.3 측정장치

본 실험에서 액적의 크기는 Malvern Particle Sizer를 이용하여 측정하였다. 본 장치는 He-Ne 레이저를 사용하며, 빔의 회절원리를 이용하여 입자의 크기를 측정하는 장치이다. 측정 입경범위가 $5.8 \mu m \sim 564 \mu m$ 인 300mm 렌즈를 사용하였다. 인젝터로부터 수직거리 5, 7, 9cm로 높이를 변화시켜가며 측정하였고, 각 높이에서 수평방향으로 1cm 간격으로 측정하였다. 방해도(Obscuration) 0.01~0.5사이의 신뢰할 수 있는 값들만을 채택하였다.

상대적 분포구간 지수(Relative Span Factor)는 다음과 같이 정의되며, MMD(mass median diameter)에 대한 액적들의 크기 범위를 나타낸다.[8]

$$\Delta = \frac{D_{0.9} - D_{0.1}}{D_{0.5}}$$

$D_{0.9}$: 이 액적의 직경보다 작은 액적들의 누적 체적이 전체 액적체적의 90%에 해당하는 직경.

$D_{0.5}$: 이 액적의 직경보다 작은 액적들의 누적 체적이 전체 액적체적의 50%에 해당하는 직경. (Mass Median Diameter)

$D_{0.1}$: 이 액적의 직경보다 작은 액적들의 누적 체적이 전체 액적체적의 10%에 해당하는 직경.

상대적 분포구간 지수가 클수록 액적들의 크기 범위가 넓다는 것을 의미한다.

액적들간의 균일도를 분석하기 위해서 Rosin-Rammler 분포식을 이용하여 분산과 평균을 구한 후 그 결과를 이용하여 유도된 다음과 같은 표준편차 σ 를 도입하였다.[9]

$$\sigma = X \left[\frac{2\Gamma(2/N)}{N} - \left(\frac{\Gamma(1/N)}{N} \right)^2 \right]^{1/2}$$

1-D Patternator를 사용하여 분무 연료의 체적 분포를 측정한다.

Patternator는 9mm×9mm의 정사각형 셀 30개 (1×30)를 일렬로 배열한 것으로 셀과 셀사이의 벽면 두께는 1mm이다. 셀로 유입된 연료는 각 셀에 연결된 1/4" 동관을 통하여 각 시험관으로 채집된다.

3. 결과 및 고찰

3.1 체적분포

3.1.1 연료온도변화에 따른 영향

Figure 3은 압력을 5kgf/cm²으로 유지시키고, 온도를 변화시켜가며 1번 인젝터와 2번 인젝터 각 각을 단독 분무시켰을 때와 두 인젝터간 거리를 5cm로 위치시킨 후 동시 분무시켰을 때의 체적분포를 나타낸다.

Figure 3의 (a) 연료온도 -20°C의 경우, 각각의 분무를 산술적으로 합하였을 때와는 다른 형상을 나타낸다. 산술적인 합인 경우, 2번 분무의 주유동 영역 우측 셀(17번)에서 최대 채집량을 나타내야 하지만 좌측 셀(16번)에서 최대 채집량을 갖는다. 또한 최대 채집량을 정량적으로 볼 때, 1번 분무의 우측 최대 채집량(17번 셀)과 2번 분무의 좌측 최대 채집량(16번 셀)을 합한 것과 같다. 이는 연료의 온도가 매우 낮아서 점도 및 표면장력이 크기 때문에 미립화가 부진하여 대다수의 액적들이 충돌 후 반경방향 속도성분을 잃고, 충돌면에 축적되는 것으로 생각된다.

(b) 연료온도 -10°C의 경우, 최대 채집량의 위치는 2번 분무의 좌측면에 나타난다. 그러나 최대 채집량이 연료온도 -20°C의 경우에 비하여 절반 이하로 감소했고, 2번 분무의 중앙부와 우측면으로도 상당량이 채집됨을 알 수 있다. 이는 온도가 증가함에 따라 점도 및 표면장력이 점차 감소하기 때문에 충돌 후 대부분의 액적들은 충돌면에 축적되고, 일부 액적들은 자신의 운동량을 유지하여 상대 분무속으로 침투하는 것으로 생각된다.

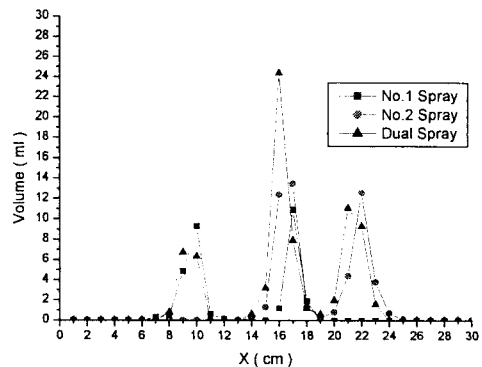
연료온도 -20°C의 경우, 온도가 낮기 때문에 각각 분무의 분무각이 작아서 1번 분무와 2번 분무의 주유동 영역이 모두 15번 셀에서 만난다. 그러나 (c) 연료온도 0°C의 경우, 온도 증가로 인하여 분무각이 증가하기 때문에 1번 분무와 2번 분무의 주유동 영역이 확연하게 교차한다.

연료온도 0°C의 경우, 2번 분무의 좌측면에 최대 채집셀이 위치하며, 2번 분무의 중간영역에 1번 분무의 형상이 또렷이 나타난다. 이것은 액적들의 충돌로 일부 액적들은 충돌면에 축적되고, 상당수의 액적들은 상대 분무속으로 침투하는 것을 알 수 있다.

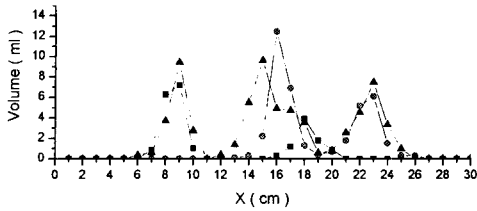
(d) 연료온도 30°C의 경우, 2번 분무의 좌측면에 약간의 액적이 충돌에 의해 축적되는 것을 볼 수 있고, 다른 영역은 1번 분무와 2번 분무의 중첩된 양과 같게 나타난다.

(e) 연료온도 60°C의 경우, 1번 분무와 2번 분무 각각의 채집량 산술합과 두 인젝터의 동시 분무 채집량이 동일하게 나타났다.

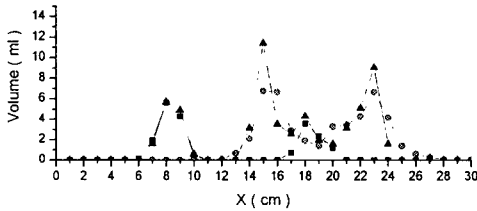
이로써 온도가 낮은 경우 점도와 표면장력이 크기 때문에 액적들간에 충돌 후 충돌영역에 대부분이 축적되지만, 온도가 증가할수록 점도와 표면장력이 감소함으로써 점차 상대 분무속으로 침투하는 액적이 증가하여 어느 온도 이상이 되면 전영역에서 두 분무의 산술합과 동일한 체적 분포를 보임을 알 수 있다.



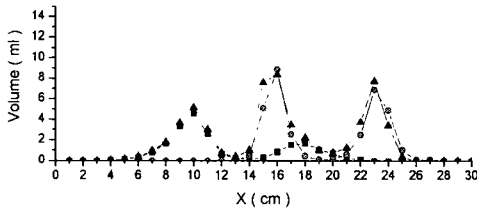
(a) Fuel Temperature = -20°C



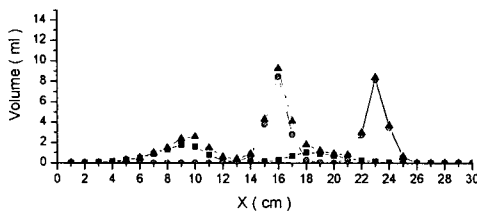
(b) Fuel Temperature = -10°C



(c) Fuel Temperature = 0°C



(d) Fuel Temperature = 30°C



(e) Fuel Temperature = 60°C

Figure 3. The effect of fuel temperature on volume concentration ($H=5\text{cm}$, $P=5\text{kg}/\text{cm}^2$, $\text{gap}=5\text{cm}$)

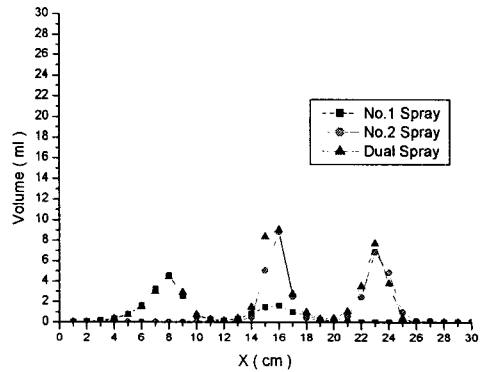
3.1.2 인젝터간 거리변화에 따른 영향

Figure 4와 Figure 5는 Figure 3과 동일 조건 하에서 인젝터간 거리를 7cm와 9cm로 변화시켰을 때를 나타낸다.

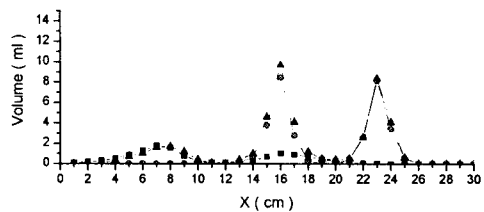
Figure 4와 5의 (a) 연료온도 30°C 의 경우, 1번 분무가 2번 분무로 침투하지 못하고 2번 분무의 좌측면에 모두 축적되는 것을 볼 수 있다. 이는 인젝터간 거리가 증가함에 따라 두 분무의 주 유동영역이 15번, 16번 셀로 일치하고, 충돌하는 액적들의 운동량이 급속하게 감소하기 때문으로 생각된다.

그러나, Figure 4와 5의 (b) 연료온도 60°C 의 경우, 각 각의 분무의 산술합과 동시 분무시의 채집량이 동일함을 알 수 있다.

이로써 어느 온도 이상에서는 인젝터간 거리에 상관없이 각 인젝터의 채적분포를 산술합한 것이 동시 분무할 때의 채적분포임을 알 수 있다.

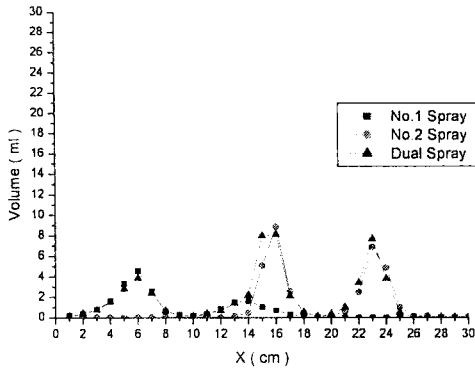


(a) Fuel Temperature = 30°C

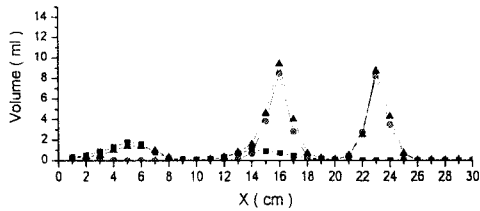


(b) Fuel Temperature = 60°C

Figure 4. The effect of fuel temperature on volume concentration ($H=5\text{cm}$, $P=5\text{kg}/\text{cm}^2$, $\text{gap}=7\text{cm}$)



(a) Fuel Temperature = 30°C



(b) Fuel Temperature = 60°C

Figure 5. The effect of fuel temperature on volume concentration (H=5cm, P=5kg/cm², gap=9cm)

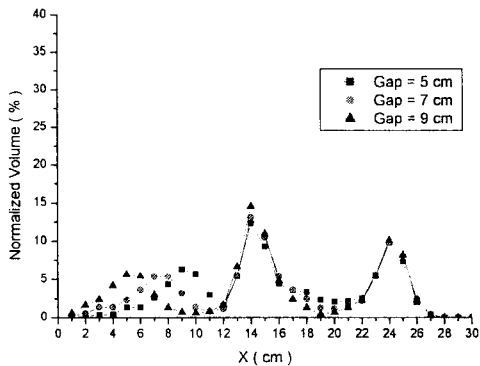


Figure 6. The effect of gap between injectors on volume concentration (H=7cm, P=5kg/cm², Temperature=30°C)

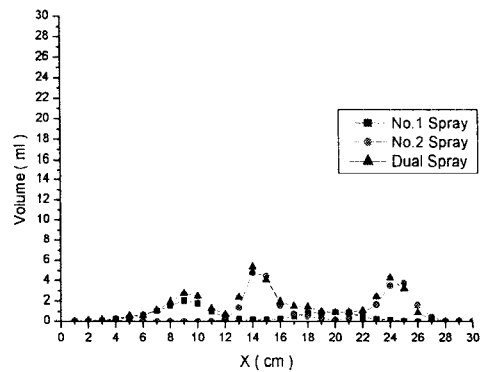
Figure 6은 온도 30°C, 압력 5kg/cm²일 때, 두 인젝터간 거리를 5cm, 7cm, 9cm로 변화시켜가며 인젝터로부터 수직거리 7cm에서 측정된 체적분

포를 나타낸다.

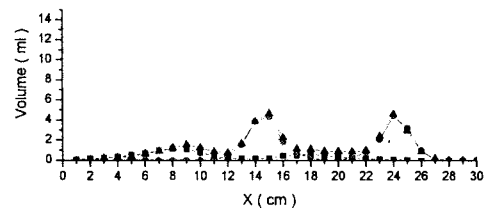
인젝터간 거리가 증가할수록 충돌면 부근의 연료 채집량이 증가한다. 또한 2번 분무 중심부분의 연료 채집량이 감소한다. 이는 인젝터간 거리가 증가함에 따라 충돌시 운동량이 감소하기 때문에 충돌 후 충돌면 부근에 연료 채집량이 증가하며, 충돌 후 상대분무 속으로 침투하는 연료량이 감소하는 것으로 생각된다.

3.1.3 인젝터로부터 수직거리 변화에 따른 영향

Figure 7은 Figure 3과 동일 조건하에서 인젝터로부터 patternator까지의 수직거리를 7cm로 변화시켰을 때의 채집량을 나타낸다.



(a) Fuel Temperature = 30°C



(b) Fuel Temperature = 60°C

Figure 7. The effect of fuel temperature on volume concentration (H=7cm, P=5kg/cm², gap=5cm)

Figure 3의 (d), (e)와 비교해볼 때, 인젝터로부터의 수직거리가 증가함에 따라 보다 넓은 영역에 걸쳐 분무가 이루어지기 때문에 최대 채집량이 감소하고, 액적의 미립화가 더욱 진행되어 채

집셀간의 편차가 줄어들어 보다 균일한 체적분포를 나타낸다.

또한, Figure 3의 (d), (e)와 동일하게 연료온도 30°C에서는 2번 분무의 좌측 셀에 약간의 체적량이 증가하는 것이 나타나고, 연료온도 60°C에서는 두 분무 각각의 산술합과 동시 분무시 체적량이 동일하다.

3.2 크기(SMD) 분포

3.2.1 연료 온도변화에 따른 영향

Figure 8은 압력 5kg/cm², 인젝터간 거리 7cm, 인젝터로부터 수직거리 5cm에서 온도를 변화시켜가며 측정한 SMD 분포를 나타낸다.

온도가 증가함에 따라 점도 및 표면장력이 감소하여 분산각이 증가하고, SMD는 감소한다. 저온영역의 경우, SMD가 크며, 변화가 심하다. 그러나 상온/고온영역에서는 SMD가 저온영역에 비해 절반정도로 상당히 작고, 편차 역시 심하지 않다.

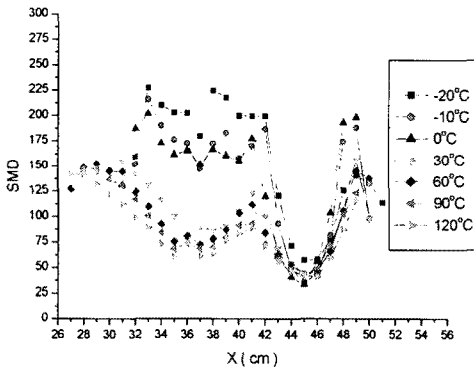


Figure 8. The effect of fuel temperature on SMD distribution (H=5cm, P=5kg/cm², gap=7cm)

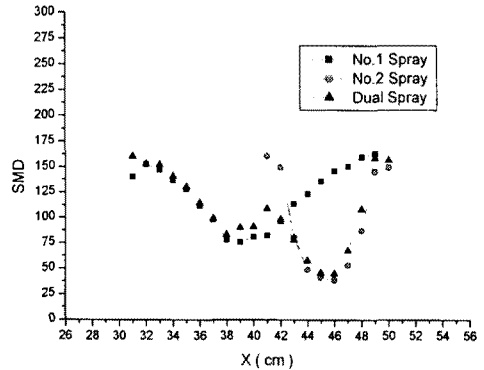
3.2.2 인젝터간 거리변화에 따른 영향

Figure 9와 10은 압력 5kg/cm², 온도 30°C, 인젝터로부터 수직거리 5cm에서 인젝터간 거리를 변화시켜가며 측정한 SMD 분포와 상대적 분포구간 지수(Relative Span Factor)를 나타낸다.

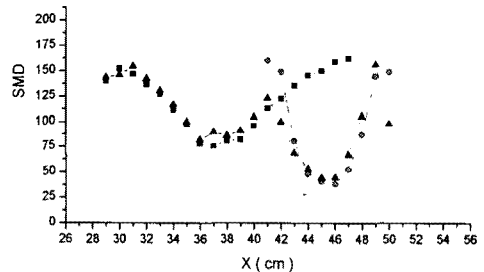
인젝터간 거리가 증가함에 따라 충돌면에서 액적의 크기가 증가한다. 이는 인젝터와 충돌면 사이의 거리가 증가함에 따라 충돌면에서 충돌하는 액적들의 운동량이 감소하기 때문으로 생각된다.

충돌면에서 상대적 분포구간 지수는 인젝터간 거리에 관계없이 각각의 단독 분무의 경우보다 약간 증가한다. 그러나 인젝터간 거리가 증가함

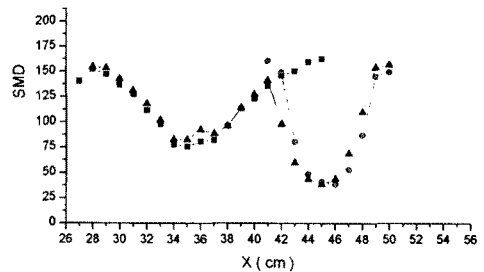
에 따라 상대적 분포구간 지수와 분무 중첩에 의해 영향받는 영역은 점차 감소한다. 이것 역시 인젝터간 거리가 증가로 충돌면에서 액적의 운동량이 감소하여 충돌후 상대분무 속으로 침투하는 액적의 양이 감소하면서 충돌에 의해 영향을 받는 영역이 줄어든다.



(a) Gap between injectors = 5cm

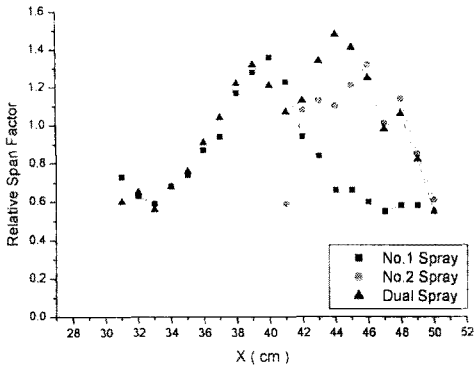


(b) Gap between injectors = 7cm

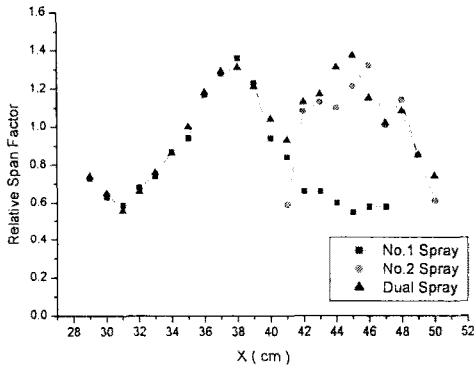


(c) Gap between injectors = 9cm

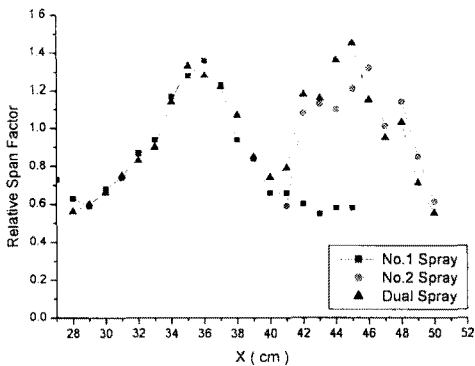
Figure 9. The effect of gap between injectors on SMD distribution (H=5cm, P=5kg/cm², Temperature=30°C)



(a) Gap between injectors = 5cm



(b) Gap between injectors = 7cm



(c) Gap between injectors = 9cm

Figure 10. The effect of gap between injectors on relative span factor distribution ($H=5\text{cm}$, $P=5\text{kg}_f/\text{cm}^2$, Temperature= 30°C)

Figure 11은 연료온도 30°C , 압력 $5\text{kg}_f/\text{cm}^2$ 일 때, 두 인젝터간 거리를 5cm, 7cm, 9cm로 변화 시키며 인젝터로부터 수직거리 7cm에서 측정 한 SMD를 나타낸다.

인젝터간 거리가 증가함에 따라 충돌면에서 연료의 SMD가 증가하지만 각 분무중심의 SMD는 감소한다. 반대로 인젝터간 거리가 가까울수록 충돌면 부근의 액적크기는 작아지며, 두 인젝터 사이의 영역에서 SMD 분포는 보다 균일해진다.

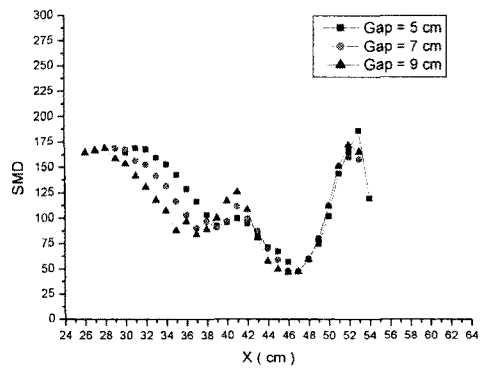


Figure 11. The effect of gap between injectors on SMD distribution ($H=7\text{cm}$, $P=5\text{kg}_f/\text{cm}^2$, Temperature= 30°C)

Figure 12는 연료온도 30°C , 압력 $5\text{kg}_f/\text{cm}^2$ 일 때, 두 인젝터간 거리와 인젝터로부터 수직거리를 5cm, 7cm, 9cm로 변화시켰을 때, 충돌면에서 액적들의 균일도를 나타낸다.

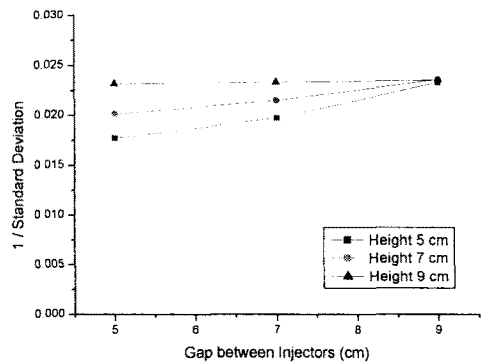


Figure 12. Influence of gap between injectors and vertical distance(height) on uniformity at collision surface.

인젝터간 거리가 증가함에 따라 균일도는 증가한다. 그러나 인젝터로부터 수직거리가 증가함에 따라 그 증가폭은 점차 감소한다. 인젝터간 거리가 9cm인 경우, 수직거리 변화에 따른 균일도 변화는 나타나지 않았다.

4. 결론

본 연구에서는 가스터빈에 사용되고 있는 Swirl injector의 분무를 이용하여 두 개의 분무가 중첩되는 영역에서 연료 온도변화와 인젝터간 거리변화에 따른 체적분포 및 SMD 분포의 변화를 알아보았다.

본 실험조건의 범위 내에서 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 연료의 특성에 따라 어느 온도 이상에서는 인젝터간 거리에 상관없이 각 인젝터의 체적분포를 산술합한 것이 동시 분무할 때의 체적분포와 동일하다.
2. 온도가 증가할수록 SMD가 감소하며, 두 인젝터 사이 영역에서 보다 균일한 분무가 이루어진다.
3. 인젝터간 거리가 증가할수록 충돌면에서 체적량과 SMD가 증가하고, 상대 분무로 침투하는 액적의 양은 감소한다. 또한, 충돌면에서 액적의 균일도가 증가한다.

후기

본 연구는 연소기술연구센터(CERC)의 지원에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] William J. Brown, "Atomization and sprays research in perspective", Proceedings of ILASS-Asia 2001, pp.13-22, 2001.
- [2] A. H. Lefebvre, "Fifty years of gas turbine fuel injection", Atomization and Sprays, vol.10, pp.251-276, 2000.
- [3] Tambour, Y. and Portnoy, D., "Spray Characteristics of Two Combined Jet Atomizer", Int. J. Turbo and Jet Engine, pp. 263-271, 1985.
- [4] Adams, J. R., Lingblad, N. R. and Hendricks, C. D., "The Collision, Coalescence and Disruption of Water Droplets", J. of Applied Physics, Vol. 39, pp. 5173-5180, 1968.
- [5] Crosby, E. J., "Atomization Consideration in Spray Processing", Proceedings of ICLASS-78, pp. 435-448, 1978.
- [6] 정지원, 강완봉, 차건중, 김덕출, "이중분무의 중첩영역에서 미시적 특성에 관한 연구", 액체미립화학회 1999년도 학술강연회 논문집, pp. 84-89, 1999.
- [7] 최경식, 박병성, 김호영, 민성기, "이중 선회 분무간의 거리와 연료온도 변화에 따른 분무특성에 관한 실험적 연구", 제23회 KOSCO SYMPOSIUM 논문집, pp. 11-15, 2002.
- [8] A. H. Lefebvre, "Atomization and Sprays", Taylor & Francis, 1989.
- [9] 조한권, "액체의 점도와 분사압력이 액적크기 분포의 균일도에 미치는 영향", 한국과학기술원 석사학위논문, 1989.