

충돌형 F-O-O-F 인젝터의 이중분무 중첩영역에서의 분무특성에 관한 연구

권기철*·이은상*·강신재**·노병준**

Spray Characteristics in the cross region of twin spray between impinging F-O-O-F type injectors

K.C. Kwon, E.S. Lee, S.J. Kang and B.J. Rho

Key Words: Impinging Injector(충돌형 분사기), Twin Spray(이중분무), Interaction Area(중첩영역), Phase Doppler Particle Analyzer(PDPA)

Abstract

This paper presents twin spray characteristics of two impinging F-O-O-F type injectors in which fuel and oxidizer impinge on each other to atomize under the various conditions. The droplet size and velocity in the impinging spray flow field were measured using a PDPA. The droplet size and velocity were investigated at mixture ratios of 1.5, 2.0, 2.47 and 3.0 for four injectors in which two single F-O-O-F injectors were arranged at intervals of 20.8, 31.2, 41.6 and 62.4mm respectively. In general, the arithmetic mean diameter, SMD and standard deviation of droplet size in the interaction area ($X=0$ and $Y=0$ mm) were smaller. The axial velocity in the interaction area was slightly higher. Considering the behavior of impinged droplets using the We number calculated by using the axial velocity instead of the relative velocity in line C in Fig. 1(b) for four injectors, it is consumed that the We number over 500 had the possibility to disintegrate, and the We number below 500 had it to cohere after impingement of twin spray. The results of this study can be used for the design of a nozzle for liquid propellant rockets.

1. 서 론

현재 많은 분야에서 광범위하게 사용되고 있는 액체로켓은 그 성능향상을 위해 많은 연구를 거듭해 왔다. 로켓의 성능에 영향을 미치는 요소 중 연소와 관련된 요소들이 기관의 성능에 가장 많은 영향을 미치고 있다. 추진기관이 정상적이고 안정적인 연소성능을 발휘하기 위해서는 연소실 내에서의 열·유체역학적 거동을 이해·분석하는 것이 가장 중요한 인자라 하겠다. 이러한 연소실 내에서의 거동을 지배하는 결정적인 요소

로 연소실 내의 분사기를 들 수 있다.

액체 추진제 추진기관은 액체 연료와 산화제의 결합으로 인해 연소를 발생시키므로 이때 일어나는 연료와 산화제의 충돌과, 이로 인해 발생하는 미립화 과정이 전체적인 성능을 크게 좌우한다. 따라서 추진기관의 성능예측을 위해서는 연소실 내 분사기의 분무특성을 정확히 고찰할 필요가 있다.

이와 관련된 연구로 Kuykendal^[1]은 충돌형 doublet 분사기에 대하여 분사속도, 오리피스 직경, 충돌각 등이 액적 크기에 미치는 영향을 조사하였고, Rupe^[2]은 doublet 분사기를 이용하여 오리피스 직경, L/D비, 충돌각 등과 혼합효율의 상관성을 찾기 위한 연구를 수행하였다. 국내에서는 강^{[3][4]}등이 이중 충돌형(F-O-O-F) 분사기

* 전북대학교 대학원

** 전북대학교 기계항공시스템공학부.
자동차 신기술 연구소

의 운동량비 변화에 따른 미립화 특성을 PDPA를 이용하여 연구하였고, 박^[5] 등은 PDPA 시스템을 이용하여 압력강하, 충돌각, 오리피스 길이대 직경비가 unlike-triplet 분사기의 미립화에 미치는 영향을 연구하였다.

실제 액체 추진제 추진기관에서 노즐은 수백개의 분사기들의 배열로 구성되어 있으므로 각 분사기의 분무 특성뿐만 아니라 분사기 사이사이에서 일어나는 재 충돌영역에서의 분무특성도 연소 성능에 중요한 영향을 미친다고 볼 수 있다. 하지만 이러한 재 충돌영역에 대한 개념은 구명되지 않은 상태이다.

따라서 본 연구에서는 이러한 분사기 사이에서 일어나는 재 충돌영역의 분무 특성을 고찰함으로써 액체 추진기관 노즐설계에 기본자료로 활용될 수 있는 실험적으로 구명된 데이터를 제시하고자 하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

충돌형 F-O-O-F 분사기 사이에서 일어나는 이중 충돌영역의 분무특성을 실험적으로 연구하기 위한 실험 장치는 실제 추진제를 대신하는 실험유체인 물을 공급하여 충돌분류를 형성시키는 충돌형 분사기, 물탱크에 담겨진 물을 충돌형 분사기로 공급하는 공급장치, 충돌분류에서 발생하는 액적의 크기 및 속도를 측정하기 위한 PDPA 장치로 구성되어 있다.

본 연구에 사용된 분사기의 형태는 Fig. 1에 나타나 있는 것과 같이, 두 개의 F-O-O-F 분사기가 L만큼 떨어져 있는 형태이다. 각각의 분사기 ①, ④번 오리피스에서는 연료분류가, ②, ③번 오리피스에서는 산화제 분류가 분사되고 ①, ② 그리고 ③, ④번 오리피스에서 나온 분류가 서로 충돌한 뒤 이 분류가 다시 2차 충돌하게 되어 혼합 및 미립자를 생성한다. 두 개의 분사기는 서로 근접해 있으므로 2차 충돌 분류는 Fig. 1(b)에서처럼 A영역에서 다시 충돌하여 분무유동장을 형성하게 된다. 연료 오리피스는 Fig. 1(a)에서와 같이 분사기 중심축과 $\theta=30^\circ$ 를 이루고 있고 산화제 오리피스는 평행하다. 연료, 산화제

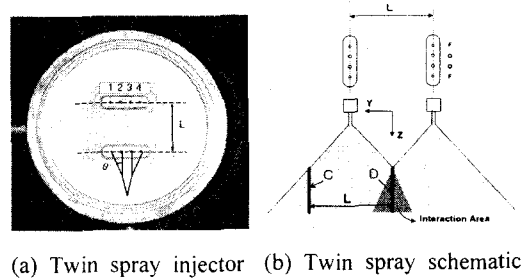


Fig. 1. Shape of Injector

오리피스 직경은 각각 1.6mm, 2.2mm 설계되었다.

Fig. 2는 본 실험에 사용된 분사장치와 PDPA 시스템의 구성도이다. 추진제 공급장치는 최대 99 l/min의 토출유량과 최고 60kgf/cm²의 토출압력을 공급해 줄 수 있는 산업용 용적형 동력분무기를 사용하였다. 액적의 크기와 속도를 측정하기 위한 PDPA 시스템은 광학계, 신호처리부, 3차원 이송계로 이루어진다. 광원으로는 공랭식 Ar-ion 레이저(350mW)를 사용하였다. 송광부는 3가지 서로 다른 파장을 가지는 레이저 빔을 측정점에 교차시켜주며, 수광부는 측정점에 빔이 교차되어 생기는 간섭무늬 영역을 액적이 통과할 때 생기는 산란광을 탐지하여 신호처리기에 공급한다. 신호처리기(DANTEC model 58N50)는 버스트 검출기(burst detector)방식으로 입자의 크기와 속도를 도플러 신호의 상대적 위상차와 주파수에 의해 측정한다. 수광센서에 공급되는 고전압(high voltage)은 1440 volt로 고정하고 측정하였으며, 각 측정점에서 1000개의 데이터를 샘플링하여 처리하였는데, 이 때 샘플링에 소요되는 시간은 10초 이내로 제한하였다.

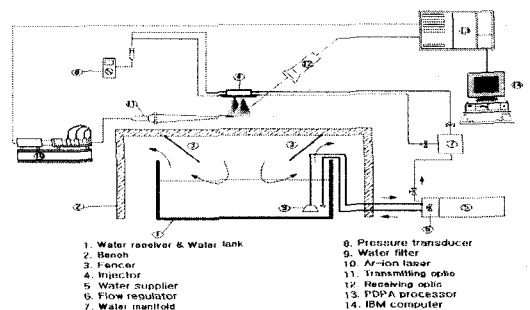


Fig. 2. Schematic diagram of Injection and PDPA system

2.2 실험방법

분사기에 의한 층돌 분류 유동장은 타원형태의 분류구조를 갖게 되는데, 층돌분류가 유동하는 방향을 Z축, 타원의 장축방향을 Y축, 단축방향을 X축으로 정의하고, 유동축 방향의 속도를 u 라 정의 하였다.

본 연구에서는 두 분사기 사이의 거리 L 을 변화시키므로 이중분무영역에서의 분무 현상을 관찰하고자 하였다. Table. 1은 본 실험에 사용된 4개의 인젝터가 가지는 분사기 사이의 거리(L)를 나타내고 있다.

Table 1 Experimental Condition

Injector	L(mm)	r	\dot{m}_f (g/s)	\dot{m}_o (g/s)
No.1	20.8	1.5	208.0	312.0
No.2	31.2	2.0	173.4	346.6
No.3	41.6	2.47	150.0	370.0
No.4	62.4	3.0	130.0	390.0

(a) Injector interval (b) Spray conditions

또한 연료와 산화제를 합한 전체 유량을 520g/s로 고정시킨 상태에서 혼합비, 즉 연료와 산화제의 유량을 변화시키면서 각 혼합비에서의 액적 크기와 축방향 속도 성분을 측정하여 중첩 영역에서의 분무특성을 살펴보고자 하였다.

$$\text{혼합비} = \frac{\text{산화제 유량}}{\text{연료 유량}} = \frac{\dot{m}_o}{\dot{m}_f} \quad (1)$$

Table. 2는 본 실험에 사용된 혼합비와 그에 따른 산화제와 연료의 유량을 나타내고 있다.

각각의 실험 조건에 대해 분사기면에서 30, 50, 75, 100mm 떨어진 X-Y 단면에 대해 실험을 측정하였으며, 각 단면당 651개의 측정점을 설정하여 액적의 크기와 속도보는바를 측정하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 액적의 크기

분무의 미립화 특성을 알아보기 위한 방법으로 평균직경이 있으며, 분무가 형성되는 연소실 내 주요 거동은 증발과 착화등을 포함한 연소과정으로, 체적대 표면적 비로 정의되는 $SMD(D_{32})$ 가 주로 사용되고 있다. 이것은 액적의 체적과 표면

적의 변화가 증발, 열전달 및 연소를 포함한 각종 화학반응과 직접 관련이 있기 때문이다.

Fig. 3과 4는 두 개별분사기 사이의 거리(L)가 20.8mm와 31.2mm인 분사기의 $SMD(D_{32})$ 를 $X=0\text{mm}$, $Y=0\text{mm}$ 위치에서의 SMD_D 값으로 무차원시켜 Y방향에 따라 도시하였다. $Y/L=0$ 인 위치는 두 개별분무가 중첩되는 영역의 중심, 즉 Fig. 1(b)의 D라인이며, $Y/L=1$ 은 Fig. 1(b)의 C라인으로 중첩영역의 D라인과 대칭되는 위치이다. $Z=30\text{mm}$ 위치에서는 개별분무간의 중첩이 일어나지 않거나 액적의 수가 적은 분무외곽 영역에서 중첩이 일어나기 때문에 $Y/L=0$ 과 $Y/L=1$ 사이의 SMD/SMD_D 는 $Y/L=0.5$ 를 중심으로 대칭 형태를 이루며, $Y/L=0$ 과 $Y/L=1$ 의 SMD/SMD_D 값 사이에 차이를 보이지 않는다. 그리고 개별분무의 중심부인 $Y/L \approx 0.5$ 인 위치에서 상대적으로 SMD/SMD_D 값이 큰 이유는 액막에서 액적으로 분열된 액적들의 산술평균직경(D_{10})은 작지만 액막에서 떨어져 나오는 액적의 크기가 불균일하기 때문이다(Fig. 5, 6). 그러나, $Z=50\text{mm}$ 이후에서는 $Y/L=1$ 의 SMD/SMD_D 값이 1이상의 값을 가진다.

Fig. 5와 6은 두 개별분사기 사이의 거리(L)가 20.8mm, 41.6mm인 No.1, No.3 분사기의 액적 산

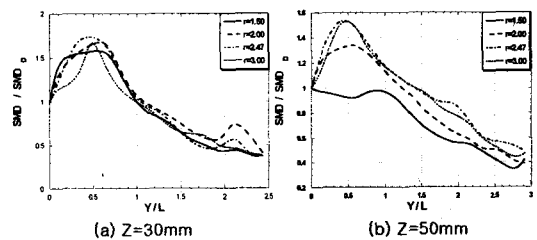


Fig. 3 SMD/SMD_D distribution along the centerline($X=0\text{mm}$) for No.1 injector($L=20.8\text{mm}$)

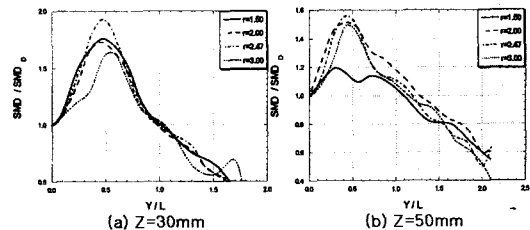


Fig. 4. SMD/SMD_D distribution along the centerline($X=0\text{mm}$) for No.2 injector($L=31.2\text{mm}$)

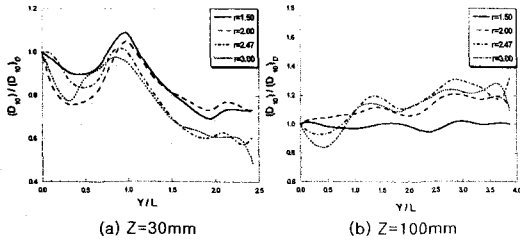


Fig. 5. $D_{10}/(D_{10})_D$ distribution along the centerline($X=0\text{mm}$) for No.1 injector($L=20.8\text{mm}$)

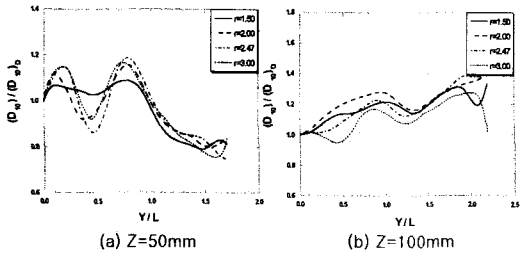


Fig. 6. $D_{10}/(D_{10})_D$ distribution along the centerline($X=0\text{mm}$) for No.3 injector($L=41.6\text{mm}$)

술평균직경(D_{10})을 $X=0\text{mm}$, $Y=0\text{mm}$ 위치에서의 산술평균직경($(D_{10})_D$)으로 무차원시켜 Y 방향에 따라 도시하였다. $Z=30\text{mm}$ 인 경우에 $r=1.50$ 과 $r=2.00$ 의 $Y/L=1$ 의 $D_{10}/(D_{10})_D$ 값은 1보다 크지만, $r=2.47$ 과 $r=3.00$ 의 $Y/L=1$ 의 $D_{10}/(D_{10})_D$ 값은 1과 비슷하거나 작다. 혼합비가 증가할수록 개별분무의 폭은 좁아지기 때문에 $r=2.47$ 및 $r=3.00$ 의 $Y/L=1$ 인 위치는 개별분무의 외곽영역이거나 아주 적은 액적들이 존재하는 지역이라 할 수 있다. 따라서, 충돌하는 액적의 상대운동량이 작기 때문에 액적들이 합착되어 나타난 결과 및 중첩이 일어나지 않은 결과라 할 수 있다. 또한, $Y/L=0.5$ 부근의 $D_{10}/(D_{10})_D$ 값이 $Y/L=0$ 이나 $Y/L=1$ 의 $D_{10}/(D_{10})_D$ 값보다 작은 것을 볼 수 있는데, $Y/L=0.5$ 는 개별분무의 중심으로 액막에서 액적으로 분열이 진행되는 상태 및 액적으로 분열된 직후이기 때문에 작은 값을 가지는 것으로 생각된다. 분무 하류로 갈수록 액적들의 크기 분포가 균일해지는 것을 볼 수 있는데 이는 액적들간의 충돌로 인해 작은 액적은 합착되어 커지고 큰 액적은 분열되어 작아짐으로서 액적크기가 균일해졌다고 볼 수 있다. 또한, 분무 하류로 진행할수

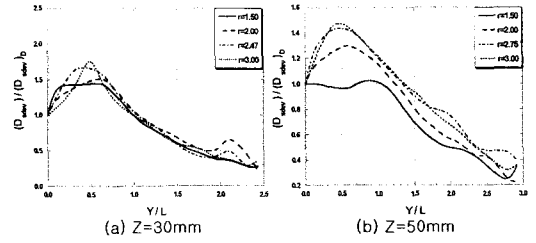


Fig. 7. $D_{sdev}/(D_{sdev})_D$ distribution along the centerline($X=0\text{mm}$) for No.1 injector($L=20.8\text{mm}$)

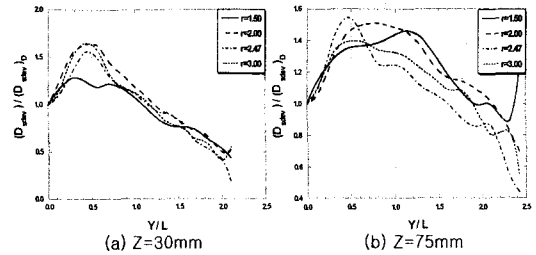


Fig. 8. $D_{sdev}/(D_{sdev})_D$ distribution along the centerline($X=0\text{mm}$) for No.2 injector($L=31.2\text{mm}$)

록 분무 외곽영역의 액적들의 크기가 커지고 있는데, 이는 분무외곽의 액적들은 운동량이 작기 때문에 액적들끼리 합착되어 나타난 결과이다. Fig. 6에서 볼수 있듯이, $Z=50\text{mm}$ 에서는 강한 분무의 중첩이 발생하지 않기 때문에 $Y/L=0$ 과 $Y/L=1$ 사이의 $D_{10}/(D_{10})_D$ 분포는 $Y/L=0.5$ 를 중심으로 대칭형태를 보임을 알수 있다. 그러나 $Z=75, 100\text{mm}$ 에서는 두 개별분무가 중첩하게 되고 분포경향이 No.1 분사기와 비슷하게 나타난다.

물리적으로 액적크기가 얼마만한 범위로 분포되어 있는가를 표현하는 균일도는 통계적인 측면에서 평균값을 기준으로 분포된 값들의 편차를 나타내는 표준편차와 직접적인 연관이 있다. Fig. 7과 8에 두 개별분사기 사이의 거리(L)가 20.8mm , 31.2mm 인 No.1, No.2 분사기의 액적 산술평균직경(D_{sdev})을 $X=0\text{mm}$, $Y=0\text{mm}$ 위치에서의 액적크기의 표준편차($(D_{sdev})_D$)으로 무차원시켜 Y 방향에 따라 도시하였다. 액적크기의 표준편차 분포는 SMD분포와 비슷하게 혼합비가 증가할수록 표준편차값은 증가함을 볼 수 있는데 이는 높은 혼합비일수록 액막에서 액적으로 완전히 분열되는 길이가 길어지기 때문에 혼합비(r)가 증가할

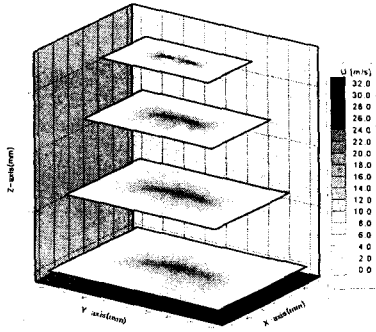


Fig. 9. Axial velocity distribution at $r=2.0$ for No.1 injector($L=20.8\text{mm}$)

수록 액막에서 액적으로 분열되어지는 액적크기의 불균일성 때문에 D_{sdev} 가 커진다. 그림에서 볼 수 있듯이, 중첩영역에서의 액적크기의 표준편차는 D_{10} 이나 SMD 분포와 비슷하게 혼합비에 관계없이 작아지는 것을 볼수있는데 이는 큰액적은 중첩영역에서 작은액적으로 분열되고, 작은 액적은 합착으로 인해 큰액적이 됨으로 액적의 크기가 보다 균일해지기 때문이다. No.2 분사기의 경우도 중첩영역에서의 액적크기의 표준편차는 No.1 분사기와 비슷한 경향을 보임을 알수있다.

3.2 액적의 축방향 속도

Fig. 9는 $L=20.8\text{mm}$ 인 분사기에 대해 혼합비가 2.0일 때 각 X-Y 단면에대한 축방향 속도 분포를 나타내고 있다. 분사가 시작되었을 때 각 분사기의 중심에서 가장 높은 축방향 속도 분포를 보이다 분무 하방향으로 진행할수록 두 분사기로 부터의 분무는 중첩하게 되고 이로인해 $Z=75\sim 100\text{mm}$ 사이에서는 하나의 일정한 속도띠를 형성하게 된다. 이는 분무 하방향으로 진행할수록 액적들로 분열되면서 운동량을 점점 잃게되어 속도가 감소하기 때문이다. 이러한 경향은 낮은 혼합비일때에는 분사기에서 얼마 떨어지지 않은 지점에서 속도가 감소하기 시작하지만, 혼합비가 증가할수록 연료 분류가 산화제 분류를 충분히 분열시키지 못하여 산화제 분류만이 분무 하방향으로 진행하게되어 각 분사기의 중심에서 높은 축방향 속도가 $Z=100\text{mm}$ 이후까지 나타나게 되고, $Z=100\text{mm}$ 인 지점에서도 각 분사기의 분무특성이 나타나고 있다.

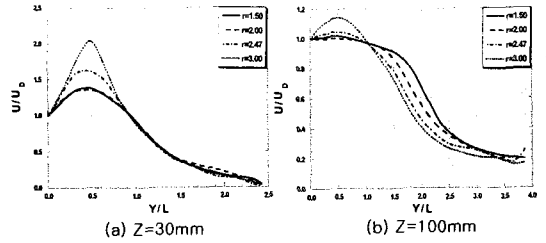


Fig. 10. U/U_D distribution along the centerline($X=0\text{mm}$) for No.1 injector($L=20.8\text{mm}$)

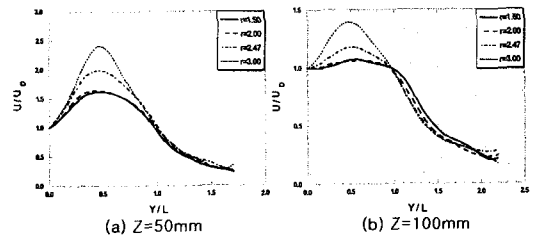


Fig. 11. U/U_D distribution along the centerline($X=0\text{mm}$) for No.3 injector($L=41.6\text{mm}$)

Fig. 10, 11은 두 개별 분사기 사이의 거리(L)가 20.8, 41.6mm인 No.1, No.3 분사기의 $X=0\text{mm}$ 인 위치에서의 축방향 평균속도(U)를 $X=0\text{mm}$, $Y=0\text{mm}$ 위치의 축방향 평균속도(U_D)로 무차원화시켜 Y 방향에 따라 도시하였다. 그림에서 볼 수 있듯이 $Z=30, 100\text{mm}$ 일때 중첩영역에서 U/U_D 값은 $Y/L=1$ 보다 약간 작음을 볼 수 있다. 이는 오른쪽 분사기에서 분열된 액적과 왼쪽 분사기에서 분열된 액적들은 서로 다른 방향의 Y 방향 속도 성분을 갖지만 같은 방향의 축방향속도성분을 가지므로 이 액적들이 재 충돌후에는 Y 방향 속도 성분은 상쇄되고 축방향 속도성분이 더욱 증가하기 때문이다. 이러한 경향은 L 에 상관없이 비슷하게 나타나고 있다.

3.3 웨버수

실제 PDDA 측정에서는 충돌하는 두 액적의 상대속도와 크기를 구분할 수 없기 때문에 측정점에서 계측된 액적들의 평균속도와 평균크기 값을 이용하여 액적의 웨버수를 구하고 이를 적용할 수 있다. 이에 액적의 웨버수를 식(2)와 같이 정의하였다.

충돌된 액적의 상태는 주의 공기 밀도의 영향

을 받는 것이 아니라 충돌하는 두 액적이 가지는 운동량의 영향을 받기 때문에 액적의 밀도를 사용하여 웨버수를 정의하였다. 또한, 측정점에서의 액적의 축방향 평균속도(U), 및 액적의 산술평균 직경(D₁₀)을 사용하였다.

$$We = \frac{\rho_L U^2 D_{10}}{\sigma_L} \quad (2)$$

Fig. 12은 Fig. 1(b)의 C라인 위치에서의 액적이 가지는 웨버수에 따라 Fig. 1(b)의 D라인 위치에서의 D₁₀을 C라인 위치에서의 D₁₀으로 나눈 값을 나타내었다. We_C가 500이상의 값을 가지는 경우에는 (D₁₀)_D/(D₁₀)_C가 1이하의 값을 가지는 것으로 나타나, 500이상의 웨버수를 가지는 두 액적이 충돌하면 작은 액적들로 분열될 가능성이 높으며, 500이하의 웨버수를 가지는 경우에는 (D₁₀)_D/(D₁₀)_C가 1이상의 값을 가지는 것도 있는 것으로 보아 두 액적이 충돌하면 큰 액적으로 합착이 일어날 가능성이 높다. 낮은 웨버수에서도 (D₁₀)_D/(D₁₀)_C가 1이하의 값을 가지는 경우가 존재하는 것은 웨버수를 계산할 때 액적의 상대속도가 아닌 축방향 평균속도(U)를 사용한 것과 각각의 측정점에서 측정된 액적의 산술평균직경(D₁₀)을 사용한 결과라 할 수 있다.

4. 결론

다양한 혼합비하에 두 개의 충돌형 F-O-O-F 분사기 사이에서 일어나는 중첩영역 분무특성을 PDPA로 측정하여 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 중첩 영역에서의 SMD, 산술평균직경, 액적크기의 표준편차와 L만큼 떨어진 Y축 상에서의 값을 비교한 결과 중첩영역에서 보다 작은 값을 보였다. 따라서, 액적들은 중첩영역에서 충돌한 후에 보다 균일해지고 작아진다는 것을 알수 있다.
- (2) 중첩 영역에서의 축방향 속도 분포는 충돌하는 액적들이 같은 방향에 축방향 속도를 가짐으로 인해 L만큼 떨어진 Y축상의 속도보다 약간 높은값을 보였다.

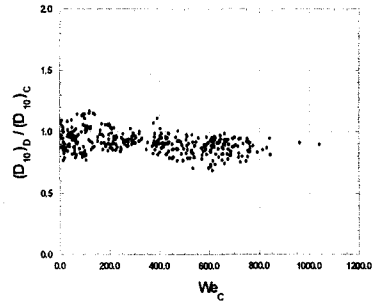


Fig. 12. (D₁₀)_D/(D₁₀)_C distribution along We number in line C

- (3) C지점에서 웨버수에 대한 (D₁₀)_D/(D₁₀)_C값을 구한결과, 500 이상의 웨버수를 갖는 액적들은 분열될 가능성이 높고 500이하값을 갖는 액적들은 합착될 가능성이 높은 것으로 사료된다.

참고문헌

- (1) Kuykendal, W. B., "The Effects of Injector Design Variables on Average Drop Size for Impinging Jets," AFRPL-TR-70-53, May 1970
- (2) Rupe, J. H., "A Correlation between the Dynamic Properties of a Pair Impinging Streams and the Uniformity of Mixture Ratio Distribution in the Resulting Spray." Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology, Pasadena, California, March 28, 1956
- (3) 강신재, 노병준, 오제하, 박상민, 권기철, "'액체로켓용 2중 충돌(F-O-O-F)형 추진제 분사기의 미립화 특성에 관한 연구,'" 한국항공우주학회지, 제27권 제7호, pp. 112~120, 1999
- (4) 강신재, 노병준, 오제하, 권기철, 박상민, "'F-O-O-F 충돌형 분사기의 분무특성에 관한 연구,'" 한국항공우주학회지, 제28권 제4호, pp. 93~103, 2000
- (5) 박성영, 김선진, 박승운, 김유, "액체로켓용 충돌형 Triplet 인젝터의 미립화 특성에 관한 연구," 대한기계학논문집(B), 제20권, 제3호, pp. 1005~1014, 1996