

이중공기공급 이류체노즐의 선회각 변화에 따른 분무특성

김의수* · 강신명* · 최윤준* · 김덕진** · 이지근*** · 노병준***

Effect of Swirl Angle on the Atomization Characteristics in Two-Fluid Nozzle with Dual Air Supplying System

E. S. Kim*, S. M. Kang*, Y. J. Choi*, D. J. Kim**, J. K. Lee***, B. J. Rho***

Key Words : Two-Fluid nozzle(이류체노즐), Swirl Angle(선회각), Dual Air Supplying(이중공기공급)
Atomization Characteristics(분무특성)

Abstract

The atomization characteristics of the dual air supplying twin-fluid nozzle were investigated experimentally using PIV and PDA systems. The two-fluid nozzle is composed of three main parts: the feeding injector to supply fluid that is controlled by a PWM (pulse-width modulation) mode, the adaptor as a device with the ports for supplying the carrier and assist air and the main nozzle to produce the spray. The main nozzle has the swirl tip with four equally spaced tangential slots, which give the injecting fluid an angular momentum. The angle of the swirl tip varied with 0°, 30°, 60° and 90°, and the ratios of carrier air to assist air and ALR(total air to liquid) were 0.55 and 1.23, respectively. The macroscopic behavior of the spray was investigated using PIV system, and the mean velocity, turbulent intensity and SMD distributions of the sprays were measured using PDA system. As the results, the mean axial velocity at the spray centerline decrease with the increase of the swirl angle. The turbulent intensities of the axial and radial velocity were increased with the increase of the swirl angle. The mean SMD (Sauter mean diameter) of the radial direction along the axial distance shows the lowest value at the swirl angle of 60°.

1. 서론

노즐에 의한 미립화는 노즐의 형상, 주위기체 및 액체의 물리적 특성, 분사압력 및 공급유량에 따라 분무의 분무각, 관통도, 분열길이, 액적의 속도 및 크기분포에 영향을 주게 된다. 이류체 노즐을 통하여 형성된 액적은 압력형 노즐, 선형 분무노즐, 외류 분무노즐 등에 비해 작고 균일하며 시간적, 공간적 분포 역시 균일한 장점을 지니고 있다. 그러나 기체의 속도가 낮은 영역에서는 미립화 특성이 나빠지는 단점을 지니고 있다. 이러한 단점을 극복하고 액체의 미립화 성능을 향상시키기 위하여 공기 또는 액체를 선회시켜 이류체의 상호충돌과 파동효과를 증대시켜 액체를 분사시키는 이류체 선회 분사노즐에 대한 연구들이 활발히 수행되고 있다.

이류체 노즐을 이용한 연구를 살펴보면, Mao⁽¹⁾는 공기보조형 선회노즐 분무에서 입자크기 분포와 공기의 속도계측에 관한 연구를 수행하여 SMD는 액체와 공기의 유량비에 선형적인 관계가 있음을 밝혔고, 분무각이 넓을수록 평균액적 직경이 작아진다는 결론을 얻었다. Rho⁽²⁾ 등은 노즐 내부에서 공기를 선회시키는 선회각의 각도와 ALR(Air/Liquid Mass Flow Ratio)의 변화에 따른 분무특성에 관한 연구를 통하여 선회각이 증가함에 따라 분무반

폭 및 난류강도는 증가하고, SMD는 감소한다는 결과를 발표하였다. Kang⁽³⁾ 등은 공기 및 물의 선회각의 각도 및 기액 유량비의 변화에 따른 축방향 평균속도, SMD, 난류강도에 대한 연구를 수행하였다. 난류강도는 중심보다는 분무군 외측에서 높고, 공기 유량이 많을수록 축방향 속도가 크고, SMD는 작다는 결과를 발표하였다. Lefebvre⁽⁴⁾ 등은 액체유로에 기체를 직접 주입시켜 2상 유동을 형성, 분사시키는 장치를 고안하였으며, Whitlow와 Lefebvre⁽⁵⁾는 노즐내부유동의 가시적 관찰을 통하여 ALR이 증가하면서 노즐내부유동이 기포류(bubbly flow), 천이류(transition flow), 환상류(annular flow)로 변함을 관찰하였다. Lee⁽⁹⁾ 등은 선회형 2유체 노즐의 선회각과 공기 공급량 변화에 따른 실험을 통하여 선회각의 증가에 따라 분사의 확산각이 증가하며, 전단 응력 분포는 선회각이 증가할수록 넓게 나타나는 결과를 발표하였다. Kim⁽¹⁰⁾ 등은 액체와 공기 둘 모두에 선회를 주었으며, 노즐 내부에서 충돌을 일으키도록 선회방향을 각각 반대로 주어서 내부 교란 효과를 증가시키도록 고안된 역선회 이류체 미립화기를 제작하여 노즐의 미립화 특성 변화를 살펴보았다.

본 연구는 작동유체로 물과 공기를 사용하였으며, 이중공기공급 구조를 가지는 이류체 선회노즐의 선회각 변화에 따른 분무특성 및 미립화 측정을 위하여 0°, 30°, 60°, 90°의 선회각을 지닌 Swirler를 제작하였으며, 선회각 변화에 따른 평균속도분포, 난류혼합특성 및 평균액적크기 등을 측정하였다.

* 전북대학교 대학원, kimeuisoo@chonbuk.ac.kr

* 전북대학교 대학원, crash7923@chonbuk.ac.kr

* 전북대학교 대학원, choiyj@chonbuk.ac.kr

** 자동차부품연구원, djkim@katech.re.kr

*** 전북대학교 정밀기계공학부, leejk@chonbuk.ac.kr

*** 전북대학교 정밀기계공학부, rhobj@chonbuk.ac.kr

2. 실험 장치 및 방법

2.1 실험 장치

본 실험장치는 노즐의 선회각 변화에 따른 분무특성과 미립화 측정에 적합하도록 구성되어 있다. 실험장치는 시험용 이류체노즐, 액체 및 공기 공급장치, 유량 조절장치, PDA System, PIV System으로 구성되어 있다. 액체공급장치는 액체를 공급하는데 사용되는 압축공기 공급원으로 이용된 컴프레서와 압력용기(pressure vessel), 압력 조절기, 압력 조절밸브 등으로 구성되어 있다. 공기공급장치는 수분제거기(water remover), 압력용기, 압력 조절기, 유량 조절밸브, 유량 계측장치(mass flow controller)로 구성되어 있다. Fig. 1은 선회각 변화에 따른 분무특성 실험에 대한 실험장치의 개요도이다.

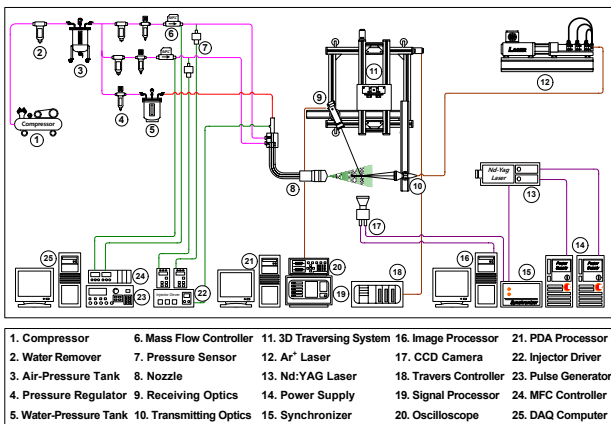


Fig. 1 Schematic for apparatus setup of Two-Fluid Nozzle

액체는 Feeding Injector에 의해 30Hz의 PWM (pulse-width modulation) 제어방식으로 노즐에 간헐적으로 공급되어진다. 사용된 인젝터는 현재 가솔린 자동차에 범용적으로 사용되어지고 있는 MPI 방식의 가솔린 자동차용 연료인젝터를 사용하였다. 인젝터를 PWM 제어방식으로 작동시키기 위해 Injector control unit를 사용하였으며, Injector control unit에 일정 주기(Hz)와 부하(duty)를 설정하여 5V의 TTL(transistor-transistor logic) 신호를 입력하면 같은 주기와 부하를 가지는 12 V TTL 신호가 출력되어 인젝터를 구동하게 된다. 단, 인젝터는 Low(0 V)에서 닫히고, High (12 V)에서 열려 수용액이 노즐에 공급된다.

노즐은 보조 공기를 이용한 미립화 성능 향상 및 액적 크기 분포 조절에 용이한 내부 혼합형 이류체 노즐을 사용하였으며, Nozzle Cap, O-ring, Swirler, Fix Pipe, Extension Pipe, Outer Pipe, Inner Pipe로 구성되어 있다.

Feeding Injector와 노즐을 연결해주며 미립화 향상을 위한 Carrier Air 및 Assist Air의 공급관로가 있는 어댑터가 노즐과 결합된 형상의 단면도 및 액체와 공기의 공급관, 액체와 공기가 혼합되어 미립화가 이루어지는 노즐 출구부분의 확대모습을 Fig. 2에 각각 나타내었다. 노즐 출구부분에서 선회를 주기 위하여 선회각이 각각 0°, 30°, 60°, 90°인 Swirler를 제작하였으며, Swirler의 출구직경은 1 mm, Nozzle Cap의 출구직경은 2 mm로 설계하였다. Table 1에 상세도를 나타내었다.

2.2 실험조건 및 측정방법

미립화를 위하여 공급되는 Carrier Air와 Assist Air는 컴프레서를 이용하여 공기를 가압하여 수분제거기를 통과시킨 후 압력용기로 공급하였다. 압력을 일정하게 유지하기 위하여 압력용기

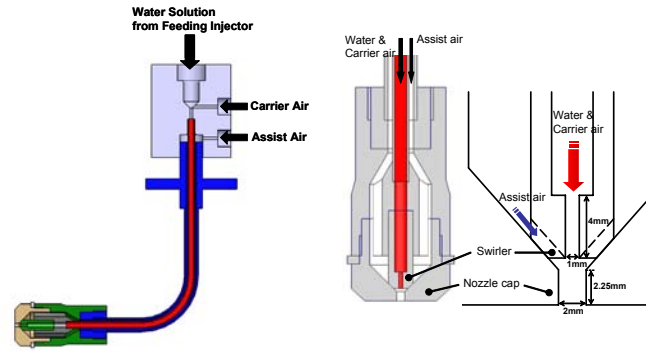


Fig. 2 Schematics of Two-fluid Nozzle

Table 1 Specification of the nozzle swirler

Swirler angle	0°	30°	60°	90°
Swirler Shape				
Swirler Hole Number	1	1	1	1
Swirler Hole Diameter(mm)	Φ1×1	Φ1×1	Φ1×1	Φ1×1
Swirler Hole Length(mm)	4	4	4	4
Length / Diameter	4	4	4	4
Swirler Hole Total Area (mm ²)	3.14	3.14	3.14	3.14
Nozzle Swirler 단면도				

Table 2 Specification of the Mass Flow Controller

Flow range	30 SLM
Valve types	Normally closed solenoid poppet valve
Working temperature range	5 ~ 45 °C
Flow rate input signals	0 ~ 5 VDC
Flow rate output signals	0 ~ 5 VDC
Required power supply	15VDC

에서 압력맥동을 소거하고, 압력 레귤레이터와 유량 조절밸브를 사용하여 일정한 유량으로 공급하였다. Carrier air와 Assist air의 공급유량을 조절 및 계측하기 위하여 두 개의 유량계(KOFLOC Co., 3660 mass flow controller)를 사용하였으며, 총 공급유량은 28.62 LPM으로 일정하다. 본 실험에 사용된 유량계의 사양을 Table 2에 나타내었다.

액체는 증류수를 사용하였으며, 압축공기로 가압된 압력용기로부터 가압공기를 사용하여 액체 압력용기를 일정 압력으로 가압한 후 압력조절밸브를 이용하여 일정 유량을 인젝터로 공급하였다. 액체의 공급유량은 모든 조건에서 27.96 g/min으로 일정하

게 공급하였다.

실험에서 요구되는 일정 압력하에서의 Carrier air, Assist air 및 액체 공급유량을 측정하기 위하여 유량계와 압력센서로부터 입력되는 전압을 디지털 값으로 변환하여 기록되어지도록 구성하였으며, 이 때 데이터 획득장치의 조절은 실시간으로 측정값들을 관찰하면서 동시에 기록이 가능하도록 구성한 프로그램을 사용하였다. 본 실험에 적용된 공기 및 액체공급 유량 조건을 Table 3에 나타내었다.

Table 3 Experimental conditions

Air Flow rate (g/min)	Carrier Air	12.24
	Assist Air	22.21
	Total Air	34.45
Liquid(g/min)		27.96
C.A/A.A		0.55
ALR		1.23

PDA 시스템의 측정위치는 노즐 출구를 좌표계의 원점으로 하여 분무의 축방향을 Z축, 반경방향을 Y축으로 설정하였다. 분무 축방향으로는 100 mm 위치까지는 10 mm 간격씩, 100에서 200 mm 사이는 20 mm 간격씩 측정 위치를 설정하였다. 분무의 반경방향으로는 30 mm 위치까지는 3 mm씩, 30에서 60 mm 사이는 10 mm 간격으로 측정 위치를 설정하였다. 측정은 3차원 이송장치를 이용하여 연속적으로 수행되었으며 각 측정점에서 25000개의 액적을 샘플링하였다. Fig. 3에 측정점을 나타내었다.

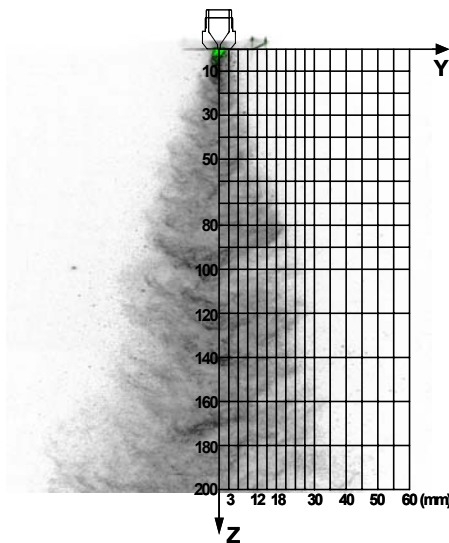


Fig. 3 Definition of axis and Measurement points

3. 결과 및 고찰

3.1 분무 이미지

Fig. 4는 선회각 0°, 30°, 60°, 90°에 대하여 Carrier air 및 Assist air 공급유량비 0.55에서 획득한 분무 이미지를 나타내고 있다. 분무 이미지는 분무 유동장의 중앙을 레이저 슈트가 통과하도록 하고 이 레이저 슈트에 대하여 수직인 방향에서 획득한 이미지이다. 따라서, 이미지에서 나타나는 빛의 밝기는 분무 내에 포함된 액적들의 수밀도와 관련된 것이다. 즉 밝게 보이는 부분은 액적의 밀집도가 큰 부분이며 어둡게 보이는 부분은 액

적이 희박한 부분이다.

분무 이미지를 살펴보면, 분무는 대칭을 이루면서 중심부의 형태가 불규칙적인 나뭇가지 모양의 수형구조를 형성하고 있음을 확인할 수 있다. 이는 간헐 분사에서 나타나는 전형적인 분무구조이다. 또한 액체공급관로 중간에 설치된 Carrier air에 의하여 액체 유동은 연속적인 흐름이 아닌 기체-액체 플러그 유동이 발생함을 분무의 수형구조로부터 알 수 있었다.

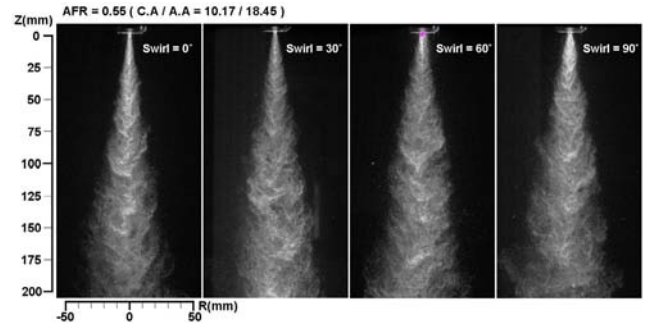


Fig. 4 Photograph illustrating atomization

3.2 축방향 거리에 대한 축방향 평균속도

Fig. 5는 선회각 0°, 30°, 60°, 90°에 대하여 노즐 출구로부터 축방향 거리에 따른 축방향 평균속도 결과를 분무중심속도로 무차원화하여 도시한 그래프이다.

모든 선회각에 대하여 노즐 출구로부터의 거리가 증가함에 따라 축방향 속도는 감소하는 경향을 나타내었다. 분무 상부에서의 축방향 속도는 선회각 변화에 따른 영향이 없었으며, 노즐 출구로부터의 거리가 증가함에 따라 즉 분무 하부로 갈수록 선회각 변화에 의한 차이를 보였다. 선회각 0°에서 가장 높은 축방향 속도를 보였으며, 선회각 60°와 90°에서는 유사한 속도분포가 나타났다.

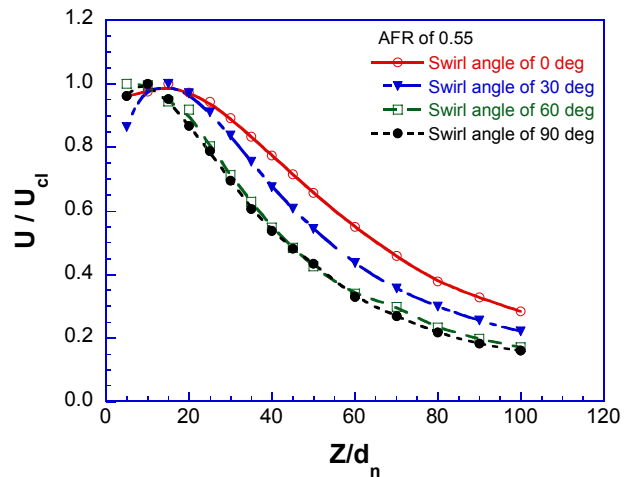


Fig. 5 Axial velocity along the centerline of spray

3.3 분무반폭

Fig. 6은 선회각 변화에 따른 분무반폭을 나타낸 그래프이다. 선회각 변화에 따른 분무반폭은 $Z/d_n=40$ 즉, 노즐출구로부터 80 mm 위치까지는 거의 유사한 경향을 나타냈으며, 그 이후에서 큰 변화를 나타내었다. 선회각이 60°일 때 가장 큰 분무반폭이 형성되었으며, 0°일 때 가장 작은 분무반폭을 형성하였다. 그리고 30°와 90°일 때는 비슷한 경향을 보였다.

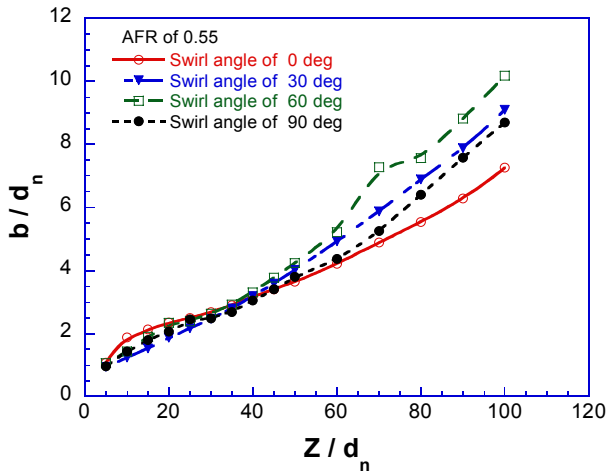
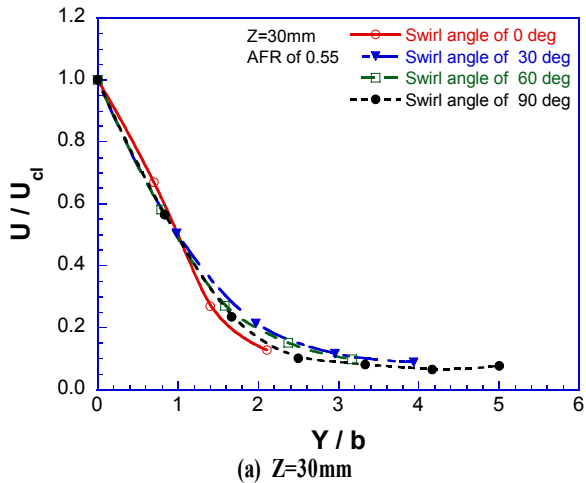


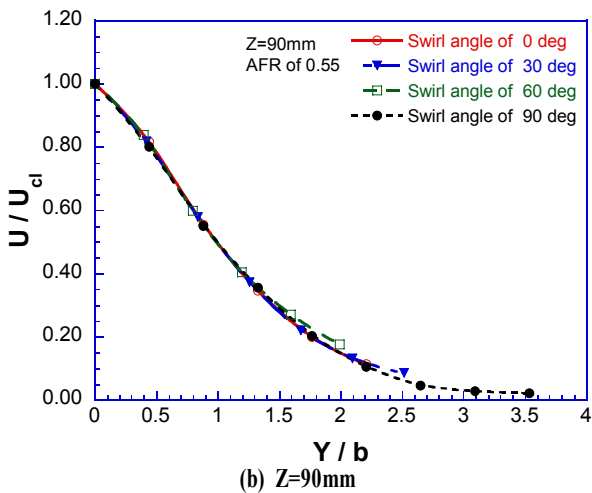
Fig. 6 Variations of half-widths

3.4 반경방향 거리에 대한 축방향 평균속도

Fig. 7은 노즐 출구로부터 축방향으로 30, 90 mm 위치에서 반경방향 거리증가에 따른 축방향 속도를 선회각 변화에 따라 나타낸 그래프이다. 노즐 출구로부터의 축방향 위치 변화 및 반경방향 거리에 따른 축방향 속도는 선회각이 변화하여도 유사한 속도분포구조를 나타내었다.



(a) Z=30mm



(b) Z=90mm

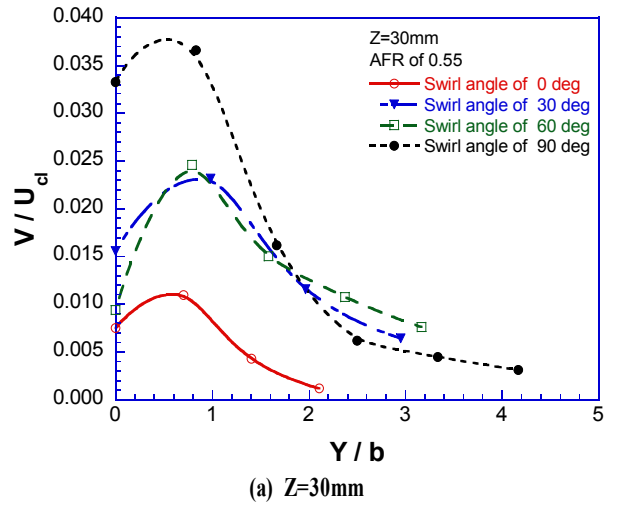
Fig. 7 Axial velocity distributions with radial distance

3.5 반경방향 거리에 대한 반경방향 평균속도

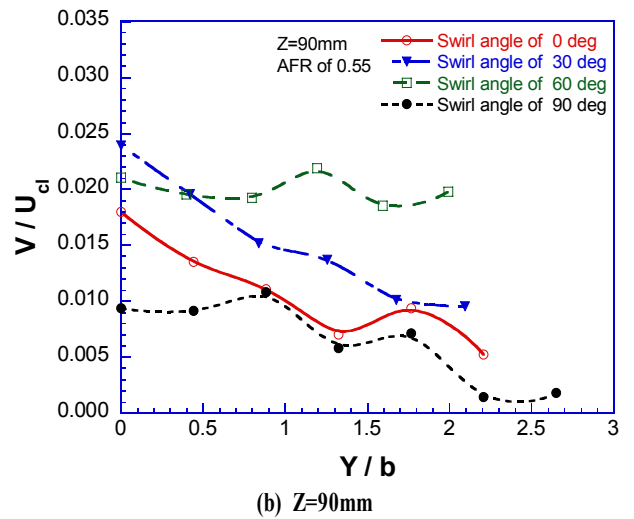
Fig. 8은 노즐 출구로부터 축방향으로 30, 90 mm 위치에서

반경방향 거리증가에 따른 반경방향 속도를 선회각 변화에 따라 나타낸 그래프이다. 노즐출구로부터 30 mm 위치에서의 반경방향에 따른 축방향 속도분포는 모든 선회각에 대하여 분무 중심에서는 증가하는 경향을 나타냈으며, 분무외각으로 갈수록 감소하였다.

선회각 변화에 따른 반경방향 평균속도는 90°일 때 가장 큰 속도분포를 나타내었으며, 선회각이 0°일 때 가장 작았다. 노즐출구로부터 90 mm 위치에서의 반경방향에 따른 축방향 속도분포는 분무중심에서 외각으로 갈수록 감소하는 경향을 나타내었다. 90 mm 위치에서는 선회각이 90°일 때 가장 작은 속도를 나타내었다.



(a) Z=30mm



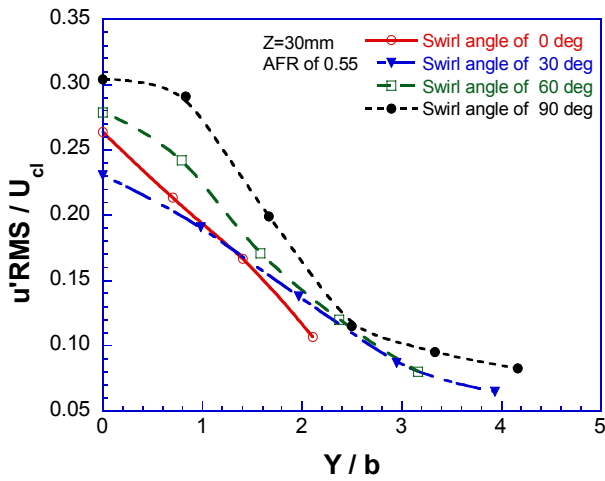
(b) Z=90mm

Fig. 8 Radial velocity distributions with radial distance

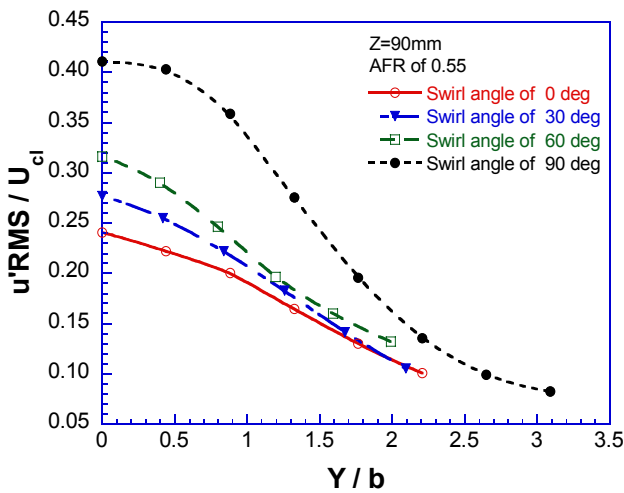
3.6 축방향 파동속도

Fig. 9는 노즐 출구로부터 축방향으로 30, 90 mm 떨어진 지점에서 반경방향으로 거리를 증가시켜가면서 측정된 축방향 파동속도 성분을 중심축의 축방향 속도로 무차원화하여 선회각 변화에 따라 나타낸 그래프이다.

선회각 변화에 따른 축방향 파동속도는 선회각이 증가함에 따라 증가하였으며, 모든 선회각에 대하여 축방향 파동속도는 분무중심에서 외각으로 갈수록 감소하는 경향을 보였다. 이러한 경향을 통하여 분무 중심부에서 보조공기와 이송공기로 인한 난류 혼합이 분무 외각에서의 주변공기 유입등으로 인한 난류 혼합보다 활발히 진행됨을 예측할 수 있었다.



(a) Z=30mm



(b) Z=90mm

Fig. 9 Turbulence intensity distributions with radial distance

3.7 반경방향 파동속도

Fig. 10은 노즐 출구로부터 축방향으로 30, 90 mm 떨어진 지점에서 반경방향으로 거리를 증가시키면서 측정한 반경방향 파동속도 성분을 중심축의 축방향 속도로 무차원화하여 선회각 변화에 따라 나타낸 그래프이다.

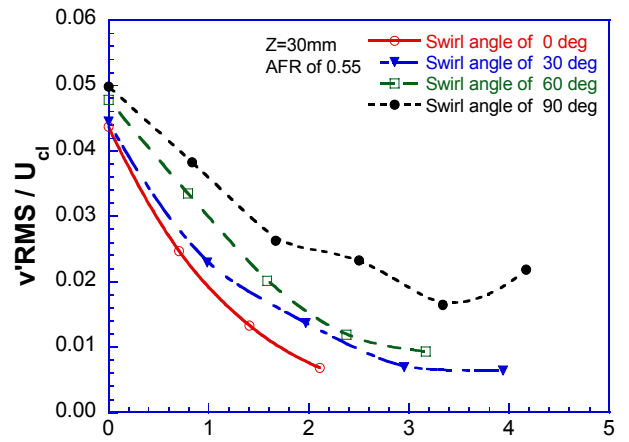
선회각 변화에 따른 반경방향 파동속도는 축방향 파동속도 결과와 마찬가지로 선회각이 증가함에 따라 반경방향 파동속도도 증가하였다. 모든 선회각에 대하여 반경방향 파동속도는 분무중심에서 외각으로 갈수록 감소하는 경향을 보였으며, 이러한 결과는 축방향 파동속도와 마찬가지로 분무 중심부에서 보조공기와 이송공기로 인한 난류 혼합이 분무 외각에서의 주변공기 유입등으로 인한 난류 혼합보다 활발히 진행됨을 예측할 수 있었다.

3.8 SMD 분포

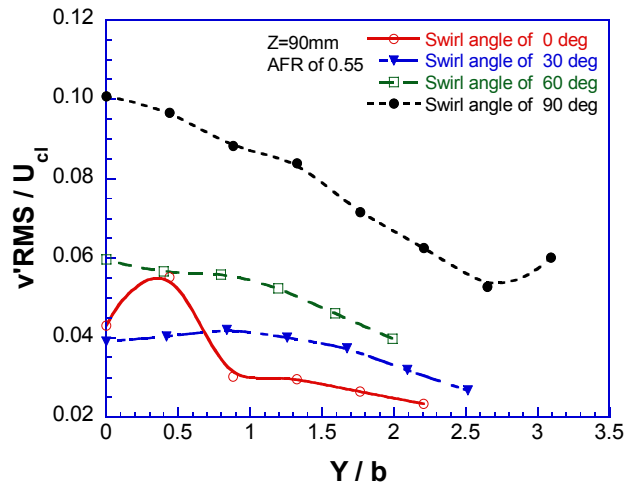
Fig. 11은 노즐 출구로부터 축방향으로 30, 90 mm 떨어진 지점에서 반경방향으로 거리를 증가시키면서 측정한 SMD를 선회각 변화에 따라 나타낸 그래프이다.

Z=30 mm 위치에서의 SMD는 분무 중심영역에서는 선회각 0°에서는 감소하였으며, 선회각 30°, 60°, 90°는 일정한 값을 형성하였다. 그러나 분무외각에서는 모든 선회각에서 증가하는 경향을 나타내었다. Z=90 mm 위치에서는 모든 선회각에서 분무

외각으로 갈수록 증가하는 경향이 나타났다. 이는 분무외각으로 갈수록 주변 공기의 유입과 액적의 스월운동으로 인하여 난류유동이 활발해짐으로 인해 주변 액적들과의 혼합으로 인한 결과로 예측된다.

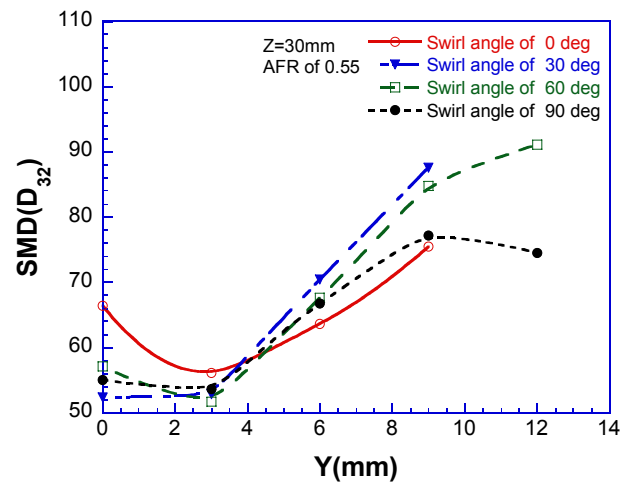


(a) Z=30mm



(b) Z=90mm

Fig. 10 Turbulence intensity distributions with radial distance



(a) Z=30mm

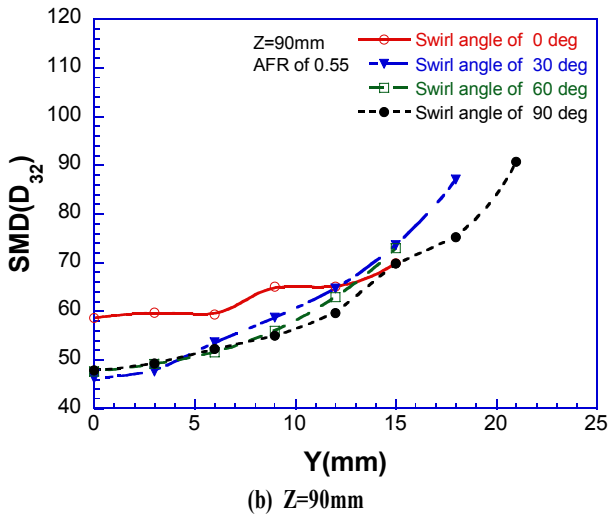


Fig. 11 SMD distributions with radial distance

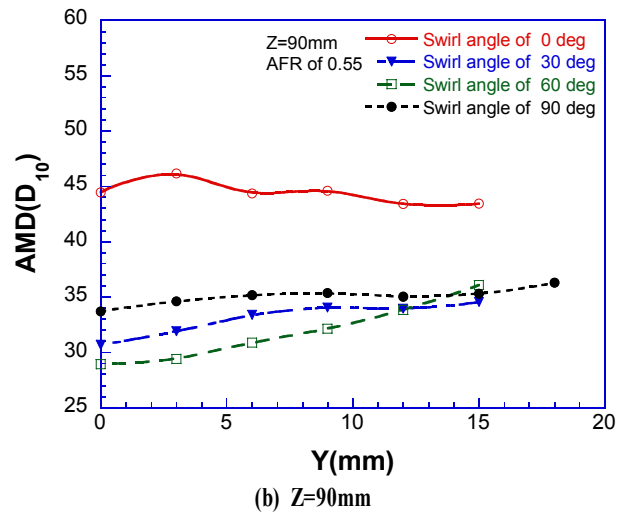


Fig. 12 AMD distributions with radial distance

3.9 AMD 분포

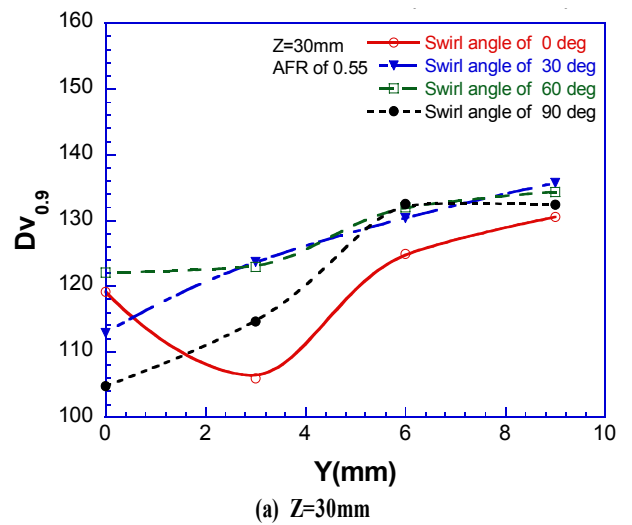
Fig. 12는 노즐 출구로부터 축방향으로 30, 90 mm 떨어진 지점에서 반경방향으로 거리를 증가시키면서 측정된 AMD를 선회각 변화에 따라 나타낸 그래프이다.

선회각 변화에 따른 AMD는 선회각이 60°일 때 가장 작은 값을 나타내었다. 분무 상단부, Z=30 mm 위치에서의 AMD는 반경방향 거리가 증가함에 따라 감소하였으며, 분무 외각에서는 거리증가에 따라 증가하는 경향을 나타내었다. 분무 하단부, Z=90 mm 위치에서는 일정한 AMD 값을 나타내었다.

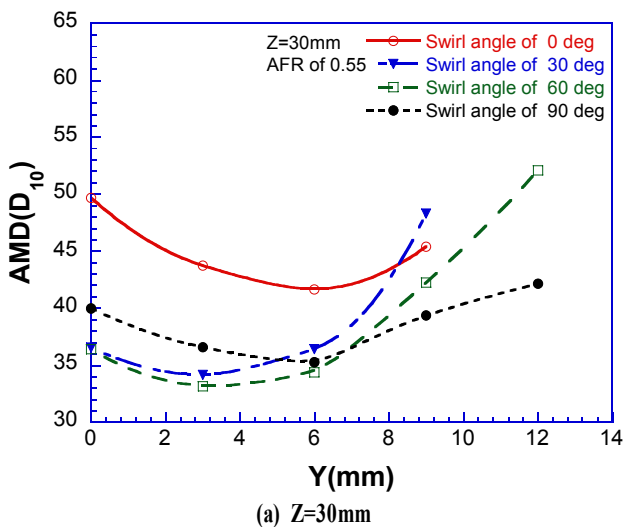
3.10 Dv0.9

Fig. 13은 노즐 출구로부터 축방향으로 30, 90 mm 떨어진 지점에서 반경방향으로 거리를 증가시키면서 측정된 Dv0.9를 선회각별로 도시한 그래프이다.

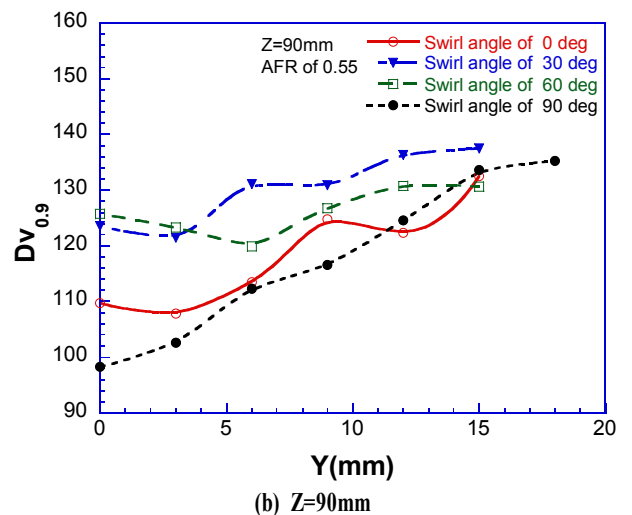
Dv0.9는 분무외각으로 갈수록 증가하는 경향을 보여주었다. 이는 SMD와 AMD의 결과와 유사하며, 분무외각에서 주변공기의 유입과 액적의 스웰운동으로 인한 난류유동으로 액적들간의 흡착으로 인한 결과로 예측되어진다.



(a) Z=30mm



(a) Z=30mm



(b) Z=90mm

Fig. 13 Dv0.9 distributions with radial distance

3.11 Mean SMD와 Mean AMD

Fig. 14와 15는 노즐출구로부터의 거리변화에 따른 반경방향 거리에서의 평균 SMD와 AMD를 선회각 변화에 따라 그래프로 나타낸 것이다. SMD와 AMD는 선회각이 0°일 때 높았으며, 60°일 때 가장 작은 경향을 보였다.

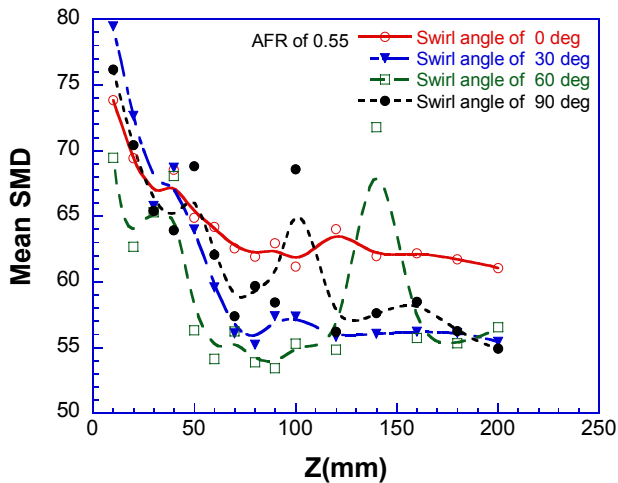


Fig. 14 Mean SMD distributions with radial distance

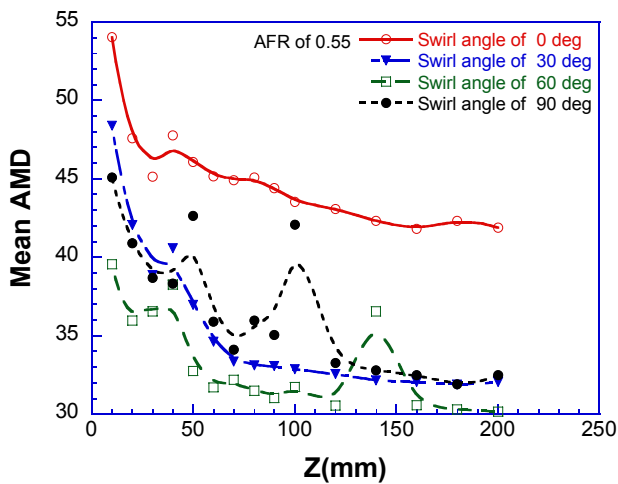


Fig. 15 Mean AMD distributions with radial distance

4. 결론

이중 공기공급 구조를 가지는 이류체 선회노즐을 제작하여 선회각 변화에 따른 분무이미지를 획득하였고, PDA를 이용한 액적의 크기 및 속도 측정으로부터 분무의 미립화 특성을 고찰한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 분무는 대칭구조를 이루고 있으며, PWM (Pulse-width modulation) 제어방식에 따른 간헐분사 특성으로 인하여 중심부의 형태가 불규칙적인 나뭇가지 모양의 수형구조를 형성하고 있음을 알 수 있었다.
- (2) 노즐 선회각의 선회각 변화에 따른 분무반폭은 선회각이 60° 일 때 가장 큰 분무반폭을 형성하였다.
- (3) 분무 중심축에서의 축방향 평균속도는 선회각이 0°일 때 가장 높게 나타났으며, 선회각이 증가할수록 감소하는 경향을 보였다. 또한 무차원화된 축방향 속도의 반경방향 분포는 Z=50 mm 이후부터 상사성을 보임을 알 수 있었다.
- (4) 축방향 및 반경방향 과동속도는 선회각이 90°일 때 가장 높게 나타났으며, 노즐 선회각의 선회각 변화에 따른 AMD 및 SMD는 선회각이 60°일 때 가장 작은 값을 나타냈으며, 0°일 때 가장 큰 값을 나타냄을 확인할 수 있었다.

후기

본 연구는 지역혁신인력양성사업에 의한 지원을 받아 수행되었습니다. 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- [1] C. P. Mao, V. Oechsle, "Drop Size Distribution and Air Velocity Measurements in Air Assist Swirl Atomizer Sprays", ASME, Vol 109, pp. 64-69, 1987.
- [2] Rho, B. J., Kang, S. J. and Oh, J. H., "Swirl Effect on the Spray Characteristics of a Twin-Fluid Jet", KSME International Journal, Vol. 12, No. 5, pp. 899-906, 1998.
- [3] Kang, W. B., Kim, D. J., "Flow Characteristics of Spray with Changing Swirl Angle of Twin-fluid", KSME, 2000.
- [4] Lefebvre, A. H., Wang, X. F., "Spray Characteristics of Aerated-Liquid Pressure Atomizers" J. propulsion and Power, Vol. 4, No. 4, pp.293-298, 1988.
- [5] Whitlow, J. D. and Lefebvre, A. H., "Effervescent Atomizer Operation and Spray Characteristics", Atomization and Sprays, Vol. 3, pp.137-155, 1993.
- [6] Sovani, S. D., Sojka, P. E. and Lefebvre, A. H., "Effervescent Atomization", Progress in Energy and Combustion Science 27, pp. 483-521, 2001.
- [7] Roesler, T. C. and Lefebvre, A. H., "Studies on Aerated-Liquid Atomization", Int. J. Turbo Jet-Engines, Vol. 6, pp. 221-229, 1989
- [8] Kufferath, A., Wende, B., and Leuckel, W., "Influence of liquid flow conditions on spray characteristics of internal-mixing twin-fluid atomizers" International Journal of Heat and Fluid Flow 20, pp. 513-519, 1999.
- [9] 이경재, 오제하, 강신재, 노병준, "A Study on the Turbulence Characteristics of a Swirl Jet Nozzle" KSAE 춘계학술대회, pp. 245-250, 1995.
- [10] Kim, N. H, Lee, S. G., "Study on the Atomization Characteristics of a Counter-swirling Two-phase Atomizer with Variations of Swirl angle", KSME 춘계학술대회, pp. 125-130, 2001.
- [11] Kim, J. Y., Lee, S. Y., "Identification of Internal Flow Pattern in Effervescent Atomizers", 대한기계학회논문집 B, Vol. 24, No. 2, pp. 306-315, 2000.
- [12] Kim, H. J. and Lee, C. W., "Breakup Characteristics in Plain Jet Air Blast Atomizer(I)" 대한기계학회논문집 B, Vol 21, No. 8, pp. 1009-1023, 1997.
- [13] 이강웅, 김원태, 노병준, "공기 선회형 연료 분사기의 미립화 특성에 관한 연구" KSME 추계학술대회, pp. 429-434, 1997.
- [14] 김영진, 정지원, 최경민, "노즐의 스윙러각과 형상비가 이중 분무의 평균속도와 입경의 크기에 미치는 영향", 대한기계학회, Vol. 28, No. 1, pp. 1459-1466, 2004.
- [15] Lefebvre, A. H., "Atomization and Sprays", Hemisphere Pub. 1989.
- [16] Lee, S. Y., "Atomization of the Liquid", Minumsa, 1996.
- [17] Kim, M. H., Lee, S. Y., "Two-Phase Flow Heat Transfer", Dayoungsa, 1993.