

〈論 文〉

Y-Jet 노즐에서의 혼합관 길이변화에 따른 분무특성 연구

송시흥* · 이상용**
(1994년 3월 10일 접수)

Change of Spray Characteristics with Mixing Port Length of Y-Jet Atomizers

Si Hong Song and Sang Yong Lee

Key Words: Atomization(미립화), Burner(연소기), Y-Jet Atomizer(Y-Jet 노즐), Droplet(액적), Entrainment/Deposition(유입/부착), Drop Size(입경), Liquid Film(액막)

Abstract

Experiments have been performed to find out the effect of the mixing port length of Y-jet atomizers on the spray performance, using air and water as the test fluids. Water and air flow rates and drop sizes were measured at each injection pressure condition for different mixing port length. The air flow rate was almost unaffected by the change of the mixing port length. However, the water flow rate was relatively susceptible to the change of the mixing port length. The mixing point pressure was very much influenced by the mixing port length. Variations of spatial distribution of Sauter Mean Diameter(SMD, D_{32}) and the cross-section-averaged SMD ($D_{32,m}$) with different mixing port length and air/water mass flow rate ratio were examined. Generally, when the mixing port length was reduced, the mean drop size decreased and became spatially even.

기 호 설 명

D_{32} : Sauter Mean Diameter (μm)
 d : 관 직경 (m)
 G : 질량유속 ($\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$)
 l : 관 길이 (m)
 P : 압력 (Pa)
 Re : 레이놀즈 수
 v : 체적밀집도
 W : 질량유량 (kg/min)

위첨자

- : 평균 (mean)

아래첨자

f : 액체공급관 또는 물
 g : 기체공급관 또는 공기
 m : 혼합관 또는 단면평균

그리스문자

ρ : 밀도 (kg/m^3)
 σ : 표면장력 (N/m)
 μ : 점도 ($\text{kg}/\text{m s}$)

1. 서 론

Y-Jet 노즐은 상(phase)이 서로 다른 두개의 유체를 내부에서 혼합하여 분무하는 내부 혼합형 2유체노즐의 일종으로 Fig.1에서 보는 것과 같이 액체연료와 분무촉진용 기체(공기 혹은 수증기)(atomizing fluid)를 노즐내부의 혼합관(mixing port)에

*한국과학기술원 기계공학과

**정희원, 한국과학기술원 기계공학과

서 혼합한 후 밖으로 분사한다. 이 형태의 노즐은 미세한 분무입경을 얻을 수 있는 잇점이 있기 때문에 주로 산업용 보일러나 연소로 등의 연소기(burner)에 사용되고 있다.

이 Y-jet 노즐에 대한 설계나 작동에 관한 내부 유동 및 분무기구 등은 그간 잘 알려지지 않았고 초기에 수행된 연구들은 주로 노즐의 제원(각 공급관의 직경, 액체공급관과 기체공급관 사이의 각도, 혼합관 길이와 직경의 비 등)에 따른 입경의 크기를 비교하여 설계에 관련된 제반조건들을 제시하는 것이었다. 이런 연구의 예로는 Mullinger와 Chigier⁽¹⁾가 실험연구를 통하여 분무 노즐설계에 관련된 기본적인 방법을 제시한 것과 Prasad⁽²⁾가 서로 다른 Y-jet 노즐과 연료들을 사용하였을 때 나타나는 입경을 비교하여 설계기준을 설정한 것 등이 있다. 이 연구결과들을 기준으로 하여 분사조건에 따른 기체 및 액체유량과 입경 등의 변화를 예측하고자 하는 연구가 Hurley와 Doyle⁽³⁾에 의해 수행되었으며 구체적으로는 기체공급관과 액체공급관을 통한 유량계수와 혼합점 압력에 대한 실험식들이 제시되었다. 그들은 혼합점의 압력과 혼합관의 단면적의 비의 함수로 표현하였다. 그리고 Graziadio 등⁽⁴⁾과 Andreussi 등⁽⁵⁾의 ENEL그룹은 혼합점 압력과 혼합관에서의 압력강하를 해석하기 위해 혼합관내 유동을 일차원 압축성유동으로 가정하였다. 여기서 그들은 혼합관내의 2상유동 마찰계수를 액체/기체의 질량유속비 및 혼합관 길이에 대한 직경의 비의 함수로 나타내었다. 또한 Lee 등⁽⁶⁾과 인왕기 등⁽⁷⁾은 혼합관내의 유동을 환상류 및 환상-분무류로 가정하고 혼합점에서 두 유체의 혼합에 의한 상호작용(마찰효과)과 혼합관 내에서의 액적의 유입을 고려하는 수력학적 모델을 제시하였으며 이를 이용하여 기체와 액체의

질량유량을 예측하고자 하는 연구를 수행하였다.

이러한 기존의 연구들은 혼합관내의 유동을 단순히 환상-분무류의 형태^(1,4,7)로 가정하고 있거나 혹은 공기의 주류에 액체가 혼합된 압축성유동⁽⁵⁾으로 가정하고 있다. 그러나 혼합관내의 유동상태는 단순한 축대칭 형태의 환상-분무류로만 한정되는 것이 아니고 액체와 기체의 운동량의 비에 따라 달라지며, 이 때문에 입경의 크기와 분포가 변한다는 것이 De Michele 등⁽⁸⁾에 의해서 알려져 있다. 또, 입경의 크기에 미치는 혼합관 길이의 영향을 살펴본 기존 연구결과들에 의하면 혼합관 길이가 길수록 입경이 감소한다는 연구결과⁽¹⁾와 각 유체의 운동량전달에 필요한 혼합관 길이만 확보되면 길이의 증가가 분사과정을 개선하지 못한다는 연구결과⁽²⁾들이 있다. 이 상반된 결과들에 대하여는 Mullinger와 Chigier⁽¹⁾ 뿐만 아니라 Prasad⁽²⁾도 구체적으로 설명하지 않고 있다. 다만 Andreussi 등⁽⁵⁾이 Y-jet 노즐 혼합관 내에서의 운동량전달, 액적의 합착/부착(coalescence/deposition) 등에 의해 입경이 변화하며 이는 혼합관 길이와 혼합관 내에서의 공기의 속도와 밀도에 의해 영향을 받는다고 추정하고 있다. 이러한 연구결과들로부터 Y-jet노즐에서의 분무특성은 혼합관내의 2상유동 상태와 밀접한 관계가 있으며 이 유동상태는 액체와 기체의 운동량의 비(혹은 기체/액체의 질량유량비) 뿐만 아니라 혼합관 길이에 의해서도 영향을 받는다는 것을 알 수 있다. 따라서 Y-jet 노즐로부터 입경의 크기 및 분포상태를 보다 정확하게 파악하기 위해서는 혼합관 길이 및 기체/액체의 질량유량비에 따라 혼합관 내부유동 형태와 그에 상응하는 미립화(atomization) 기구 등의 변화에 대해 살펴볼 필요가 있다. 본 연구에서는 혼합관 길이가 각기 다른 여러개의 Y-jet 노즐들을 이용하여 기체(공기)/액체(물)의 질량유량비를 변화시켜 가면서 혼합관 길이가 내부유동 특성(분사압력과 유량과의 관계) 및 분무특성(입경의 크기와 분포 등)에 미치는 영향을 살펴 보고자 한다.

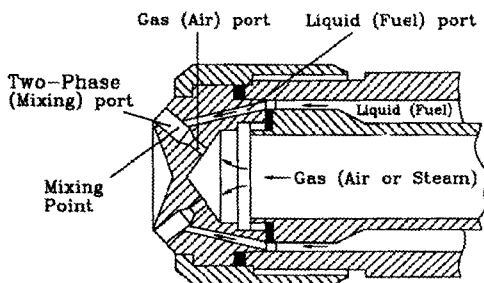


Fig. 1 Y-jet atomizer

2. 실험장치 및 실험용 노즐

2.1 실험장치의 구성

본 실험연구에서 Y-jet 노즐의 분무특성 및 내부 유동 특성을 살피기 위해 사용한 실험장치는 Fig. 2에 나타낸 것과 같으며 분무액체로서 물을 사용하

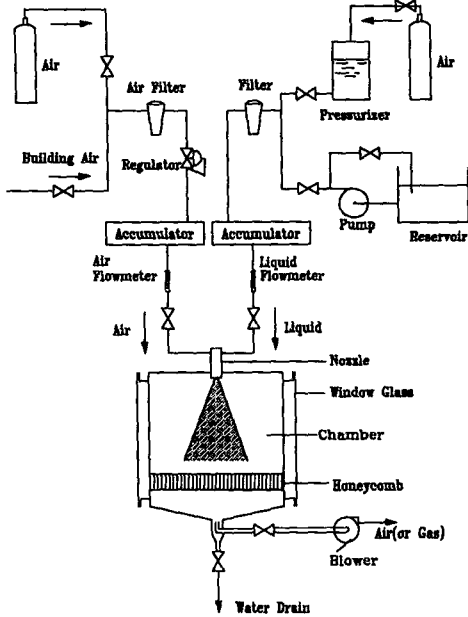
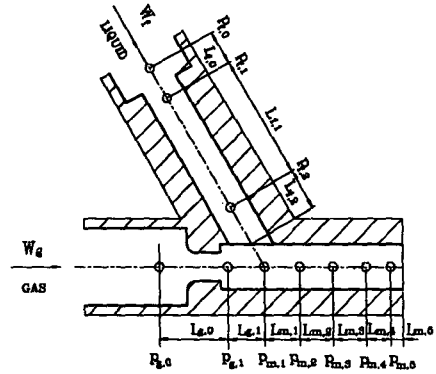


Fig. 2 Experimental set up



		unit : mm		
Atomiser	N1	N2	N3	
$L_{g,0}$	6.3	6.3	6.3	
$L_{g,1}$	1.5	1.5	1.5	
$L_{f,0}$	4.0	4.0	4.0	
$L_{f,1}$	10.0	10.0	10.0	
$L_{f,2}$	3.2	3.2	3.2	
$L_{m,1}$	2.0	2.5	5.0	
$L_{m,2}$	2.0	2.5	5.0	
$L_{m,3}$	2.0	2.5	5.0	
$L_{m,4}$	1.0	2.5	5.0	
$L_{m,5}$	-	1.0	1.0	

Fig. 3 Geometries of Y-jet atomizers and pressure tap locations

었다. 물은 펌프를 사용하여 가압한 후 분무 노즐에 공급하였으며 고압실험의 경우에도 물을 공급할 수 있도록 가압기(pressurizer)를 준비하였다. 가압된 물은 필터를 거쳐 압력변동을 방지하기 위해 설치된 완충기(accumulator)를 통과한다. 완충기를 통과한 물은 다시 유량계를 거쳐 Y-jet 노즐의 액체공급관으로 공급된다. 그리고 분무축진용 기체로는 실험실에 공급되는 공기를 사용하였으며, 공기압력은 정압기(regulator)에 의해 실험조건으로 조절된 후 완충기 및 유량계를 거쳐 공기공급관으로 공급된다. 이렇게 공급된 물과 공기는 실험용 챔버(chamber, 단면적 500 mm×500 mm, 높이 1 m)에서 노즐로부터 분사되어 분무공간을 형성하게 된다. 분사된 물은 챔버 하부에 설치되어 있는 배출구(drain)를 통하여 배출되며 공기는 배출구에 설치된 송풍기(blower)의 흡입에 의해 외기로 방출되었다.

2.2 실험용 노즐

본 실험에서 사용한 2유체 Y-jet 노즐의 내부 형상 및 제원은 Fig. 3에 나타낸 것과 같다. 실험용 노즐들은 혼합관 길이(혼합점($p_{m,1}$)에서 출구까지의 길이)를 제외한 다른 부분은 모두 같은 크기를 갖고 있다. 유동에 따른 내부 압력변화를 측정하기

위해 각 노즐의 기체 및 액체공급관, 그리고 혼합관에 압력측정구를 만들었다. 이들 노즐에서 측정할 수 있는 압력으로는 기체 및 액체공급관 입구에서의 분사압력($p_{g,0}$, $p_{f,0}$), 액체공급관의 압력($p_{f,1}$, $p_{f,2}$), 그리고 기체공급관 출구에서의 압력($p_{g,1}$) 등이 있다. 또한 2상유동 구간에서의 혼합특성을 살펴보기 위해 혼합관내의 압력을 여러지점에서 측정할 수 있도록 하였다. N1노즐의 혼합관내에서는 4군데($p_{m,1} \sim p_{m,4}$)의 압력을 측정할 수 있으며 상대적으로 혼합관 길이가 긴 N2, N3노즐의 혼합관내에서는 5군데($p_{m,1} \sim p_{m,5}$)의 압력을 측정할 수 있다. 이 노즐들을 이용하여 측정하고자 하는 실험항목은 분사압력과 유량, 혼합관 내부에서의 압력강하, 분무 후 공간상의 입경분포와 단면 평균 입경 등이다.

Fig. 2에 나타난 실험장치와 이들 3종류의 노즐을 이용하여 수행한 실험범위는 물 분사압력이 최대 6.4×10^5 Pa(유량은 약 5.0 kg/min)이고, 공기의 최대 분사압력과 유량은 각각 5.7×10^5 Pa, 0.29 kg/min이다.

3. 측정장치 및 실험방법

3.1 측정장치

노즐로 공급되는 물과 공기의 유량의 측정은 부유(float)식 유량계(FL105, omega)를 사용하였으며 노즐 각부에서의 압력측정은 압력변환기(pressure transducer, P22-AB, transmetrics)를 사용하였다. 이들 측정기기들은 사전에 보정실험을 통해 정확도를 확인하였으며, 그 결과 물 유량계의 오차는 $\pm 2\%$, 공기 유량계의 오차는 $\pm 6\%$, 그리고 압력변환기의 측정오차는 $\pm 1\%$ 정도였다.

입경측정에 사용한 기기는 광산란의 원리를 이용한 malvern particle sizer(model: 2604LC)이다. 이 장치를 이용하여 각 노즐에 대한 공간상의 입경 분포를 측정하였으며 그 측정위치는 Fig. 4에 나타낸 것과 같다. Y-jet 노즐에 대한 입경은 노즐 출구로부터 측방향거리 $z=20\text{ cm}$ 위치에서 y 축방향으로 5 mm 간격을 두고 측정했으며 그 결과는 Rosin-Rammler의 분포함수를 사용하여 나타내었다. 입경측정시 obscuration값이 0.5 이상이 되는 경우에 발생하는 다중 산란효과의 보정은 Dodge⁽⁹⁾의 식을 이용하였다. 또한 입경측정결과를 측정치

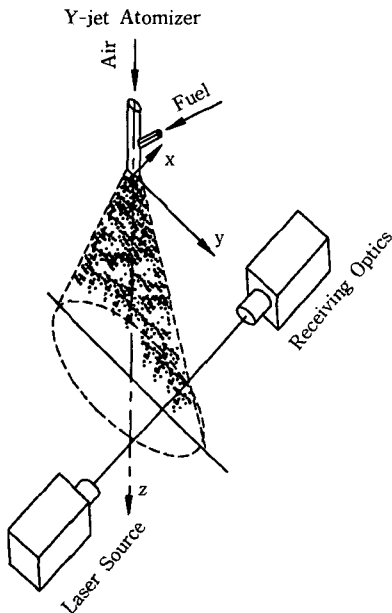


Fig. 4 Drop size measurement by malvern particle sizer

의 산포(scatter) 정도에 따라 2에서 4번 측정된 결과로부터 평균값을 취하였으며 그 평균값은 측정결과와의 $\pm 15\%$ 이내에 분포하였다.

3.2 실험방법

본 실험에서는 공기의 분사압력을 4.03, 5.03 및 $5.7 \times 10^5\text{ Pa}$ 에서 약 $\pm 5\%$ 이내로 일정하게 유지시킨 상태에서 물의 분사유량을 변화시켰다. 이 때 물의 유량변화에 따른 공기의 유량과 노즐 각부에서의 압력을 측정하고, 또한 malvern particle sizer를 이용하여 액적의 크기를 측정하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1 내부 유동형태

본 연구에서는 혼합관내에서의 두 유체의 혼합형태를 관찰하기 위해 아크릴로 N3노즐과 동일한 제원을 갖는 투명한 노즐을 만들어 가시화를 시도하였다. 그러나 혼합관경이 작고($d_m=3.5\text{ mm}$) 내부 유동속도가 너무 빨라 전체적인 혼합관 유동형태는 가시화하지 못하였고, 단지 혼합점(mixing point, $d_{m,1}$ 있는 지점) 부근에서 액체공급관으로부터 분사된 액체(물)의 거동만 살펴볼 수 있었다. 그의 개략도를 Fig. 5에 나타내었다.

이 결과에 의하면 공기/물의 질량유량비(W_g/W_f)가 큰 경우에는 액체(물)의 운동량(momentum)이 상대적으로 작기 때문에 액체공급관에서 분사된 물은 맞은편 벽면에 직접 접촉하지 못하고 액체공급부가 있는 벽면을 따라 액막을 형성하면서 흐르게 된다. 이 액막을 형성하고 있던 물의 일부는 하류

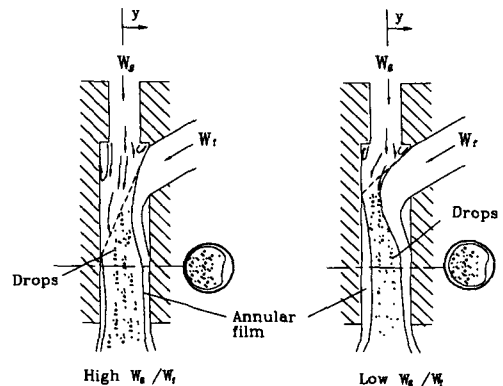


Fig. 5 Schematic illustration of two-phase flow pattern within mixing ports

로 흘러가면서 혼합관 벽면을 따라 원주방향으로 이동하여 공급관이 있는 맞은편 벽면에도 액막을 형성하게 한다. 그리고 관 중심부의 빠른 공기의 흐름에 의해 액막으로부터 액적이 이탈된다. 이렇게 액막에서 이탈된 액적들은 공기유동에 유입(entrainment)되어 이동하고, 유입된 액적들 중 일부는 액막이 존재하지 않는 혼합관 벽면에도 부착하여 그 부분의 액막형성을 촉진시킨다. 따라서 공기/물의 질량비가 클수록 액체공급관 맞은편 혼합관 벽면에서의 액막형성은 더욱 하류에서 나타난다. 이 유동조건에서는 액적이 액막으로부터 이탈되는 양이 부착되는 양보다 크게 된다. 그러나 W_g/W_f 가 작아지면 액체의 운동량이 상대적으로 증가하게 되어 액체공급관에서 분사된 물은 액체공급관 맞은편의 혼합관 벽쪽으로 중심부분을 가로질러 이동한다. 이 때 물은 공기의 흐름에 다량으로 노출됨으로서 혼합점 근처에서 상당한 부분이 액적으로 이탈된다. 이 액적들은 공기의 흐름에 유입되어 혼합관을 따라 하류로 유동하면서 그 중 많은 양이 벽면에 부착된다. 즉, W_g/W_f 가 작은 상태에서는 액체공급관 맞은편 혼합관 벽면에서의 액막형성은 혼합점 부근 가까이에서 시작되고, 하류로 이동하면서 계속되는 부착과 벽면을 따라 이동되어 온 물에 의해 이 액막은 점차 두꺼워지게 된다. 그리고 혼합관 길이가 길수록 액적들이 부착이 용이하고 아울러 벽면을 타고 흐르는 물의 원주방향 이동에 필요한 길이가 확보되므로 액막의 두께는 혼합관 내벽에 걸쳐 거의 균일해진다.

이와 같이 혼합관 내부에 형성되는 액막 형성과정과 액적이탈/부착 및 두께의 비대칭성은 혼합관 내부에서의 압력강하뿐만 아니라 노즐밖에서의 입경분포에도 영향을 미치게 된다.^(5,8) 특히 액적이 액막으로부터 공기흐름상에 주로 유입되는 내부유동 조건(즉 W_g/W_f 가 클 때)이면 혼합관 길이가 길수록 액막의 두께가 감소하므로 노즐 밖에서의 입경은 전반적으로 작아질 것이다. 반면, 혼합점 근처에서 액체공급관 맞은편의 벽면에 액막이 형성되는 조건에서는 혼합관 길이가 길수록 액막의 두께가 혼합관 전단면에 걸쳐 균일해지고 또한 두꺼워지므로 입경분포는 상대적으로 대칭성을 보이게 될 것이다.

4.2 노즐내부의 압력분포

Fig. 3에 나타난 압력측정구조로부터 노즐내부의

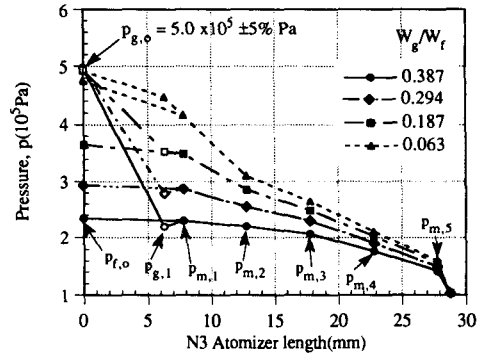


Fig. 6 Measured pressure within N3 atomizer

압력을 측정하였으며 N3노즐의 노즐 내부 압력변화에 대한 대표적인 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 혼합관내의 압력강하는 각 공급관으로 분사되는 공기/물의 질량유량비(W_g/W_f)에 따라 그 형태가 달라지고 있다. 즉, W_g/W_f 가 클 때($W_g/W_f=0.387$)의 혼합관내의 압력강하(혼합점 압력($p_{m,1}$)에서부터 출구직전 압력($p_{m,5}$)까지의 압력강하) 형태가 전반적으로 왼쪽으로 볼록한 곡선의 형태를 보이다가 W_g/W_f 가 작아지면($W_g/W_f=0.187$) 직선으로 바뀐다. W_g/W_f 가 더욱 작아지면($W_g/W_f=0.063$) 혼합관내의 혼합점 근처에서 급격한 기울기의 압력강하가 일어나고 전체적인 압력강하 형태는 아래쪽으로 오목한 곡선형태를 보인다. 그리고 혼합관 내부에서의 압력강하 곡선의 최대 기울기를 나타내는 점은 W_g/W_f 가 증가할수록 혼합관하류로 이동하고 있다. 이 현상은 내부유동에서 언급한 혼합관 전체 벽면에 액막이 형성되는 지점이 공기/물의 질량유량비가 증가할수록 하류로 이동하는 것과 같은 경향을 나타내고 있다. 따라서 압력강하 곡선형태가 질량유량비에 따라 달라지는 것은 내부의 혼합형태 혹은 유동양식의 변화에 의한 것으로 추정된다.

그리고 공기의 분사압력($p_{g,0}$)을 일정하게 유지한 상태에서 W_g/W_f 가 큰 경우에서의 혼합점 압력($p_{m,1}$)은 물의 분사압력($p_{f,0}$)에 가까운 값을 갖게 되나 W_g/W_f 를 감소시키면 공기의 분사압력에 근접한 값을 갖는다. 여기서 물의 유량을 더욱 증가시키면 혼합점 압력은 결국 공기의 분사압력과 동일해지거나 혹은 공기의 분사압력보다 큰 값을 갖게 된다. 이 경우에는 혼합관으로 공급되는 공기의 유동이 차단되거나 물이 공기공급관으로 역류하는 현상이 발생하게 되어 Y-jet 노즐을 정상적으로 작동시킬 수 없게 된다. 이와 반대로 공기가 액체공

급관으로 역류되는 현상은 물의 분사압력을 특정치 이하로 낮추었을 때 발생하며 이런 역류현상들은 가시화 실험을 통하여 확인되었다. 따라서 Y-jet 노즐의 정상적인 작동구간, 즉 공기와 물의 유동이 차단되지 않는 작동구간이 존재하게 되며 어느 한계이상으로 분사압력을 올리거나 낮추어서 작동시킬 수 없다.

Fig. 7은 공기/물의 질량유량비(W_g/W_f)의 변화에 대해 혼합점(mixing point)의 압력($p_{m,1}$)을 공기의 분사압력($p_{g,0}$)으로 무차원화하여 나타낸 것이다. W_g/W_f 가 증가할수록 혼합점의 압력은 감소하는 경향을 보인다. 무차원화한 혼합점의 압력(압력비, $p_{m,1}/p_{g,0}$)은 W_g/W_f 의 증가에 따라 거의 일정한 기울기를 가지면서 감소하다가 공기공급관에서 임계유동(choking)이 발생하면 그 감소의 기울기가 달라진다. 그리고 동일한 W_g/W_f 에서 $p_{m,1}/p_{g,0}$ 은 혼합관 길이가 짧아질수록 작은 값을 갖는데 이는 혼합관에서의 유동에 대한 저항(압력강하)이 혼합관 길이와 관계됨을 의미한다. 이 그림에서 알 수 있는 사항은 작은 질량유량비의 구간에서는 유동저항에 대한 혼합관 길이의 영향이 미미하나 질량유량비가 증가할수록, 특히 기체공급관에서 공기의 임계유동이 발생하는 조건에서 그 영향이 더욱 뚜렷해지고 있다는 것이다. 이와 같이 혼합점 압력에 대한 혼합관 길이의 영향이 질량유량비에 따라 다르게 나타나는 이유에 대해서는 보다 구체적인 검토가 필요하며, 이에 대하여 다음절의 유량과 분사압력과의 관계에서 좀더 살펴보고자 한다.

4.3 질량유량과 분사압력과의 관계

Fig. 8은 3가지의 공기 분사압력에 대하여 액체(물) 분사압력을 변화시킬 때의 물의 질량유량의 변화를 나타낸 것으로 물 분사압력이 증가하면 물의 질량유량도 따라서 증가하고 있다. 또한 물 분사압력이 낮은 경우에 각 노즐을 통한 물의 질량유량은 공기의 분사압력과 무관하게 일정한 값을 갖게 되며 Fig. 8에서 보는 것처럼 곡선이 한군데($W_f=0.5\sim 1.0$ kg/min)로 모이는 것을 알 수 있다. 공기의 분사압력을 일정하게 유지한 상태에서는 전반적으로 혼합관 길이가 길수록 동일 물 분사압력에서의 물의 질량유량이 작으나 물 분사압력을 증가시키면 혼합관 길이의 영향이 상당히 줄어들고 있음을 알 수 있다. 물유량에 영향을 미치는 요소로는 혼합관내의 2상유동 저항과 공기의 흐름에 의

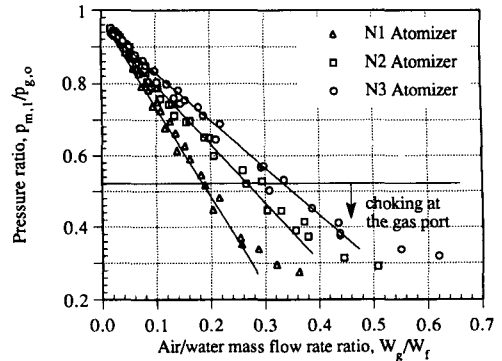


Fig. 7 Relationship between pressure ratio and air/water mass flow rate ratio

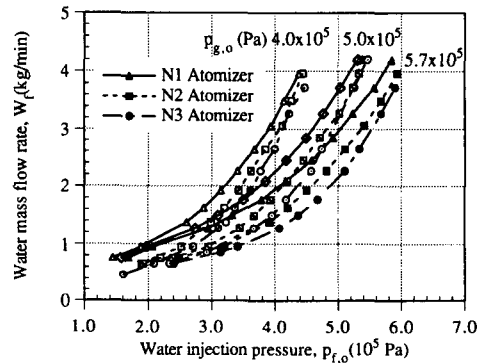


Fig. 8 Variation of water flow rate as a function of water and air injection pressures

해 물유량공급을 방해하는 막힘효과^(1,7)로 크게 나눌 수 있다. 다른 표현으로는 이들을 혼합관내에 분산된 압력강하(distributed pressure drop)와 집중화된 압력강하(concentrated pressure drop)로도 나타낸다.⁽⁴⁾ 막힘효과는 각 공급관의 출구인 혼합점 근처에서 공기와 물이 합쳐질 때 나타나는 것으로 두 유체가 각 공급관에서 분출될 때의 운동량의 차에 기인하는 것이다. 그리고 2상유동 저항으로는 전단력(마찰)과 액적의 유입/부착 등에 의한 압력강하가 있다.

Y-jet 노즐에 대한 Mullinger와 Chigier⁽¹⁾의 연구결과에서는 액체유량이 증가할수록 공기의 유동에 의한 막힘효과의 역할이 감소한다고 하였다. 한편 환상류(annular flow) 액막표면(interface)에서의 마찰계수는 액막의 두께와 유량 및 공기의 유량 등에 의해 결정되나, 공기의 속도가 커지면 공기의 속도와 관지름(tube size)에 무관하고 단지 액체의 유량에 의해서만 영향을 받는다고 Asali 등⁽¹⁰⁾이

보고한 바 있다. 그런데 이 결과들을 본 실험결과
의 설명에 적용하기 위해서는 유동저항을 혼합관
내부의 유동상태와 연계해서 살펴봐야 할 것이다.
앞서의 내부유동에서 설명한 것처럼 낮은 물 분사
압력에서의 유동(즉, W_g/W_f 가 큰 경우의 유동)에
서는 환상형태의 액막이 혼합관 하류에 이르러서야
형성되고 더우기 혼합관 길이가 짧을 경우에는 관
내 액막형성이 미흡하므로 액막으로부터 액적의 이
탈량도 역시 작게 나타난다. 그러므로 혼합관 길이
가 짧은 노즐에서의 2상유동 마찰저항의 역할은 긴
노즐의 경우에 비해 상대적으로 작아지는 반면, 막
힘효과는 상대적으로 크게 나타난다. 따라서 낮은
물 분사압력하에서는 짧은 노즐에서의 물의 질량유
량이 긴 노즐의 경우에 비해 상대적으로 크게 나타
난다. 그리고 동일 노즐에서의 질량유량은 공기에
의한 큰 막힘효과에 의해 한 곡선으로 모이게 된
다. 그러나 물 분사압력이 증가하면 Mullinger와
Chiger⁽¹⁾의 결과에서처럼 막힘효과가 상대적으로
감소하고 주로 2상유동 마찰저항에 의해서 물의 유
량이 결정된다. 이 때의 내부유동 상태는 혼합점
근처에서부터 두꺼운 액막이 형성되는 2상유동이
며, 본 혼합관 길이의 변화범위내에서는 혼합관 길
이의 증가에 따라 혼합관의 마찰압력강하(분산된
압력강하)가 점진적으로 증가하므로 물의 질량유량
은 약간 작게 나타날 뿐이다.

Fig. 9는 3가지의 공기 분사압력에 대해 액체(물)
분사압력에 따른 공기의 질량유량 변화를 나타낸
것이다. 낮은 물 분사압력(물의 질량유량)에서는
물 분사압력이 증가해도 일정한 공기 질량유량(각
공기 분사압력에 해당하는 임계 질량유량)을 유지
하다가 분사압력이 더욱 증가하면 비로소 공기의

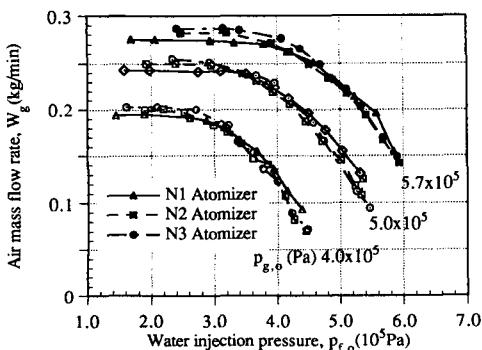


Fig. 9 Variation of air flow rate as a function of water and air injection pressures

질량유량은 감소하는 경향을 보인다. 이와 같은 경
향을 보이는 이유는 작은 물유량조건(낮은 물 분사
압력)에서는 혼합관내의 2상유동 마찰저항이 작고
혼합점 압력($p_{m,i}$)이 낮다. (Figs. 6, 7 참조) 이에
따라서 공기공급관 입출구간의 압력차($p_{g,0}-p_{g,i}$)
는 커지고 공기의 유량이 크게 나타난다. 이는 공
기공급관 입출구간의 압력차가 어느 한계 이상으로
커지면 기체유량은 임계치에 이르르게 되기 때문이
다. 그러나 물의 질량유량이 증가하면서 혼합관내
의 2상유동 마찰압력강하가 커지면, 혼합점의 압력
($p_{m,i}$)도 높아지므로 결국 공기공급관 입출구의 압
력차가 줄어들고 공기의 공급유량은 줄어들게 된
다. 다만 혼합관 길이가 가장 짧은 N1노즐에서의
공기유량의 변화는 다른 두개의 노즐에서의 공기유
량변화와 경향은 같으나 그 크기에 있어서 조금 다
른 값들을 갖는다. 즉, 물의 분사압력이 낮은 영역
에서는 N1 노즐로 공급되는 공기의 질량유량이 다
른 두개의 노즐에 비해 약간 작고 물의 분사압력이
높은 영역에서는 이와 반대의 현상이 나타나고 있
다. 임계유동 영역(낮은 물분사압력)에서의 공기유
동을 살펴보면 압축성 유체이므로 공기의 공급유량
은 공급압력만의 함수로 표시되며 공기공급관 출구
의 압력, 즉 혼합점 압력의 영향은 받지 않는 것을
확인할 수 있다. 앞서 물의 유량곡선에서도 언급한
바와 같이 짧은 노즐에서는 전체 압력강하 중에서
막힘효과에 의한 유동저항의 역할이 상대적으로 크
게 되는데, 이것은 공기의 경우에도 마찬가지다.
Fig. 8에서 짧은 노즐의 경우에 물유량이 크게 나
타나므로 물에 의한 막힘효과도 증가하여 결과적으
로 공기유량은 작아지게 한다. 반면에 물 분사압력
이 증가하게 되면 전체 압력강하 중에서 막힘효과
의 역할이 상대적으로 감소하고 주로 혼합관의 2상
유동에 의한 압력차가 중요하게 된다. 이 때 노즐
이 짧으면 혼합관 길이에 따른 2상유동 마찰저항
자체가 작아지게 되므로 그 만큼 공기의 질량유량
이 크게 나타나는 것이다.

이상과 같이 공기와 물의 분사압력과 혼합관 길
이에 따라 질량유량이 복잡하게 변화하는 이유는
액체는 비압축성인데 비하여 기체는 압축성이기 때
문이다. 다시 말해 Y-jet 형태의 분지관유동에서는
전반적으로 한쪽 유체의 분사압력의 감소는 다른쪽
의 유체유량의 증가를 가져오지만 액체 분사압력이
아주 작아졌을 때에는 압축성인 기체의 유량은 임
계유량 이상으로 흐르지 못하기 때문에 분사압력

-유량관계가 복잡해지는 것이다.

4.4 입경분포 및 평균입경

내부 혼합형 2유체 Y-jet 노즐에서의 미립화기구에 대하여 Andreussi 등⁽⁶⁾은 액체가 혼합관 내부에서 기체의 유동에 의해 액적이 이탈된 상태로 노즐 밖으로 토출되는 것과 벽면을 따라서 흐르던 액막이 노즐밖에서 다시 액적으로 분열되는 현상이 혼재한다고 제시하였다. 이와 같이 형성된 입경은 내부의 유동형태에 민감함을 보여 주고 있으며⁽⁸⁾ 입경분포는 액막의 형성상태와 공기에 유입된 액적의 양과 크기에 의해 결정되고 있음을 의미한다.

Fig. 10은 N3 노즐에서의 y축 방향에 따른 입경(SMD, D_{32})분포를 측정된 것으로 액체공급관이 연결된 쪽(+y축)의 입경이 일반적으로 크게 나타나는 비대칭의 분포를 보이고 있다. 공기/물의 질량유량비가 감소할수록 전반적으로 큰 입경분포를 보이며 특히 액체 공급관의 맞은 편(-y축)에서의 입경의 크기가 상대적으로 크게 증가하고 있다. 또한 공기/물의 질량유량비를 증가시키면 -y축상에 형성되는 입경의 크기가 거의 균일해 짐을 알 수 있다. 이는 액체공급관이 연결되어 있는 벽면에 형성되는 액막의 두께가 반대편 액막의 두께보다 두꺼움을 의미하며, 이 반대편 벽면에 형성되는 액막은 액적의 부착 및 벽면을 타고 원주방향으로 이동되어 온 액체들에 의해 형성되는 것으로서 Fig. 5의 내부 유동형태에서 설명한 바와 같이 공기/물의 질량유량비가 증가함에 따라 그 두께가 감소함을 알 수 있다.

Fig. 11은 혼합관의 길이가 서로 다른 노즐들에서 공기/물의 질량유량비를 큰 값($W_g/W_f=0.244/1.270$)으로 동일하게 유지시켰을 때의 입경분포를 나타낸 것이다. 이 그림을 보면 혼합관 길이가 짧을수록 입경분포는 거의 대칭적이며 크기도 균일해지고 있다. 이는 혼합관 길이가 짧은 노즐에서의 물은 액막을 거의 형성하지 못한 채 공기의 흐름과 직접 충돌하면서 노즐밖으로 분사되어 액적으로 분산되기 때문에 보다 균일하게 나타나는 것으로 추정된다.

그러나 공기/물의 질량유량비가 작을 경우($W_g/W_f=0.148/3.73$)에는 혼합관 길이가 길수록 전반적인 입경의 크기는 혼합관 길이가 짧은 노즐의 입경보다 크고 상대적으로 대칭적인 분포를 보이고 있음을 Fig. 12에서 알 수 있다. 혼합관 내부유동

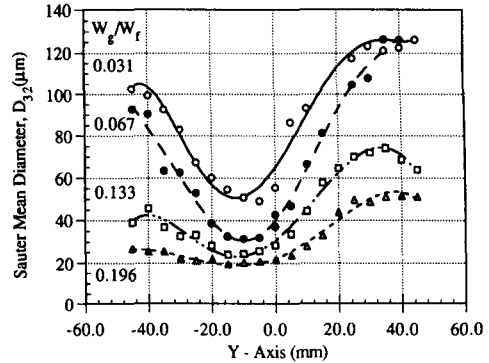


Fig. 10 SMD distribution along Y-Axis(N3 Atomizer)

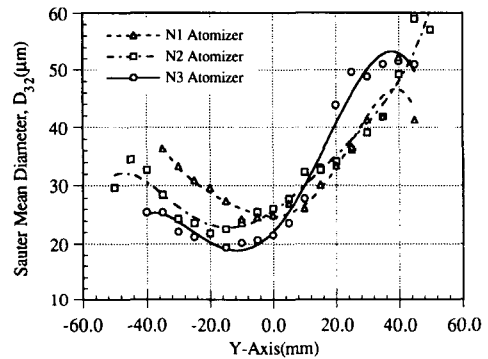


Fig. 11 SMD distribution along Y-axis ($W_f=1.270$ kg/min, $W_g=0.244$ kg/min)

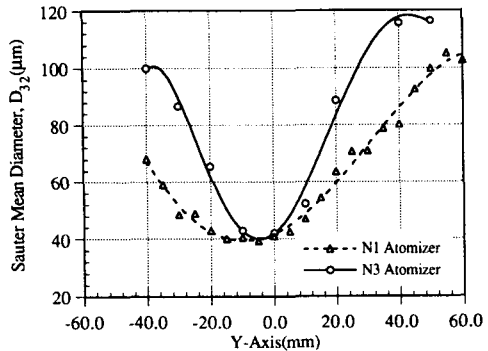


Fig. 12 SMD distribution along Y-axis ($W_f=3.73$ kg/min, $W_g=0.148$ kg/min)

에서 설명한 것처럼 공기/물의 질량유량비가 작아 질수록 혼합관에 분사된 물은 공급관 맞은편에 쉽게 액막을 형성하게 된다. 이 때 혼합점 근처에서 공기흐름상에 유입된 액적이 혼합관 하류로 이동하면서 부착되며 또한 액체공급관에서 공급된 물이 원주방향으로 벽면을 타고 혼합관내 벽면 전체에

액막을 형성하게 된다. 그런데 노즐의 혼합관 길이가 길면 상대적으로 액적이 부착될 확률이 증가하고 또한 물이 혼합관을 유동하면서 액체공급관 맞은편 벽면으로 원주방향을 따라 이동할 수 있는 길이가 확보되기 때문에 벽면전체에 거의 균일한 크기의 액막을 형성하게 된다. 따라서 혼합관 길이가 긴 노즐에서의 입경의 분포는 짧은 노즐의 입경분포보다 상대적으로 대칭적이며 큰 입경이 나타난다.

이제까지 공간상 입경분포를 나타낸 Fig. 11과 12의 결과를 Y-jet 노즐의 혼합관 유동과 연계하여 설명하였으며 특히 혼합관내에서의 액막형성과 액적의 유입/부착의 관점에서 살펴 보았다. 혼합관내에서의 액적의 부착 등에 의해 입경이 변할 것이라는 사실은 Andreussi 등⁽⁵⁾에 의해서도 보고된 바 있다. 그들은 혼합관 직경과 혼합관 내부에서의 공기 평균밀도 및 공기 질량유속으로 정의한 웨버(Weber) 수($G_{gm}^2 d_m / \rho_{gm} \sigma$)가 작은 경우(결국 기체의 속도가 작은 경우)에는 혼합관 길이가 긴 노즐에 비해 짧은 노즐에서의 단면 평균입경이 작고, 상대적으로 웨버수가 커지면(기체의 속도가 증가하면) 혼합관 길이가 긴 노즐에서의 단면 평균입경이 상대적으로 작아진다고 하였으며 그 이유로는 혼합관내에서의 액적의 합착/부착 및 운동량전달 현상이 혼합관 길이에 따라 달라지기 때문이라고 설명하고 있다.

각 노즐에서 y축 방향에 따른 입경분포를 측정하고 이를 이용하여 분무단면 평균입경을 구하였다. 이 때 사용한 식은 다음과 같다.

$$D_{32,m} = \frac{\sum_i v_i(y)}{\sum_i v_i(y) / D_{32,i}(y)}$$

Fig. 13은 분무단면 평균입경($D_{32,m}$)을 혼합관 직경(d_m)으로 무차원화하고 공기/물 질량유량비의 역수(W_f/W_g)에 대하여 나타낸 것으로 W_f/W_g 가 증가하면 $D_{32,m}/d_m$ 의 크기는 따라서 증가하고 있음을 볼 수 있다. W_f/W_g 가 아주 작은 영역에서는 혼합관 길이가 길수록 보다 작은 입경을 얻을 수 있다는 결과⁽¹⁾와도 일치하고 있다. 그러나 대부분의 W_f/W_g 영역에서는 혼합관 길이가 긴 노즐에서의 평균입경은 작은 노즐에서의 평균입경보다 크게 나타나고 있으며 이는 운동량전달에 필요한 혼합관 길이만 확보되면 길이의 증가가 더 이상 분열과정을 개선하지 않는다고 한 Prasad⁽²⁾의 결과를 뒷받

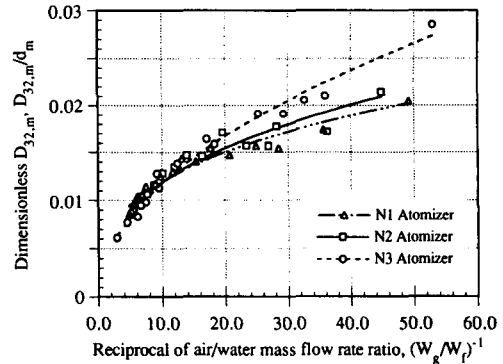


Fig. 13 Dimensionless SMD as a function of reciprocal of air/water mass flow rate ratio

침 해 준다. 즉, 평균입경의 변화는 앞서 설명한 Andreussi 등⁽⁵⁾의 결과와 전반적으로 같은 경향을 보이고 있다.

이와 같은 경향을 보이는 이유는 혼합관내에서의 액막 형성과정과 미립화된 액적들의 거동이 공기/물의 질량유량비와 혼합관 길이에 따라 달라지고 있기 때문이다. 즉, 공기/물의 질량비가 큰 영역(W_f/W_g 가 작은 영역)에서는 혼합관 길이가 길수록 혼합관내에서 이탈/유입된 액적의 양이 증가하여 상대적으로 단면 평균입경이 작게 나타나게 된다. 그러나 공기/물의 질량유량비가 작은 영역(W_f/W_g 가 큰 영역)에서는 혼합점에서 이탈된 액적의 부착 및 벽면을 따라 이동되어 온 물에 의해 액막의 두께가 전반적으로 두꺼워지고 또한 균일해지기 때문에 상대적으로 큰 입경을 갖게 되는 것이다.

이상의 결과로부터 앞서 언급한 혼합관 내부유동 상태가 입경분포와 단면 평균입경에 영향을 주고 있음을 확인할 수 있었다. 그리고 혼합관 내부유동은 기체 및 액체의 질량유량(또는 질량유량비)에 따라 달라지고 있으며 혼합관 길이는 혼합관 내부의 액막형성 및 액적의 거동(액막으로부터의 이탈 및 부착되는 양)에 영향을 주고 있음을 알 수 있었다. 아울러 본 실험을 통하여 보통 Y-jet 노즐의 사용영역(공기/물의 질량유량비가 5%내외)에서는 대체로 혼합관 길이가 짧을 수록 작은 입경을 가짐을 알 수 있었다.

5. 결 론

본 연구에서는 Y-jet 노즐에서 혼합관 길이가 내

부유동 특성과 입경분포 및 단면 평균입경의 변화 등 분무특성에 미치는 영향을 살펴 보았다.

혼합관 길이의 변화는 혼합관내의 2상유동 저항의 변화로 나타나고 이는 다시 혼합점의 압력에 영향을 주고 있음을 알 수 있었다. 공기/물의 질량유량비가 증가함에 따라 혼합점 압력은 감소하고 특히 기체공급관에서 임계유동이 발생하는 경우에 혼합관 길이가 짧을수록 혼합점의 압력은 더욱 낮아진다. 액체 분사압력이 작은 영역에서는 공기공급관에서 임계유동이 발생하여 압축성인 공기의 질량유량은 혼합점 압력(혼합관내의 압력강하, 즉 혼합관 길이)에 의한 영향을 받지 않게 되고 상대적으로 물에 의한 막힘효과의 역할이 증대하게 된다. 또한 이 유동영역에서는 공기에 의한 막힘효과의 역할이 상대적으로 증가하게 되므로 동일 노즐에서의 물의 질량유량은 한 곡선으로 모이게 되고 혼합관 길이가 짧아질수록 2상유동 마찰저항이 감소함으로써 짧은 노즐에서의 물의 질량유량은 긴 노즐에 비해 상대적으로 커진다. 따라서 공기의 질량유량은 물의 막힘효과에 의해 짧은 노즐에서 상대적으로 작아진다. 반면, 액체 분사압력이 큰 영역에서는 공기유량에 대한 막힘효과의 역할이 상대적으로 감소하고 2상유동 마찰저항에 의한 영향이 중요하게 된다. 따라서 혼합관 길이가 짧으면 2상유동 마찰저항 자체가 줄어들기 때문에 공기의 유량은 긴 노즐에 비해 약간 크게 나타난다. 액체(물) 질량유량의 경우에도 혼합관내의 2상유동 저항의 감소에 따라 짧은 혼합관 길이에서 전반적으로 유량이 커진다.

공기/물의 질량유량비가 큰 경우에는 혼합관 길이가 짧은 노즐에서의 입경분포가 긴 노즐에 비해 보다 균일해진다. 반면 공기/물의 질량유량비가 감소하면 긴 노즐에서의 입경분포는 상대적으로 대칭성을 보이며 입경은 짧은 노즐에 비해 크게 나타난다. 이와 같은 분포를 보이는 것은 혼합관 내부에서의 액체의 유동, 즉 액막형성과 혼합관 내부에서 공기의 흐름에 의해 미립화된 액적의 유입/부착에 기인하는 것으로 추정된다. 또한 공기/물의 질량유량비의 역수가 작은 영역에서는 혼합관 길이가 짧은 노즐에서의 평균입경이 긴 노즐에서의 평균입경보다 크게 나타나나, Y-jet 노즐이 실제적으로 사용되는 유량비 영역(공기/물의 질량유량비의 역수가 큰 영역)에서의 입경은 혼합관 길이가 짧을수록 작아짐을 확인할 수 있었다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 목적기초 연구사업(KO SEF-92-51-00-02), 국방과학연구소 장기기초 연구사업(ADD-90-5-5) 및 원자력연구소(KAERI) 중장기 연구사업의 연구비지원으로 이루어졌으며 이에 대하여 관계자 여러분께 감사드린다.

참고문헌

- (1) Mullinger, P. J. and Chigier, N. A., 1974, "The Design and Performance of Internal Mixing Multijet Twin Fluid Atomizers," *Journal of the Institute of Fuel*, Vol. 47, pp. 251~261.
- (2) Prasad, K. S. L., 1982, "Spray Characterisation of Air Blast Atomisers," *Proc. ICLASS-82*, pp. 123~130.
- (3) Hurley, J. F. and Doyle, B. W., 1985, "Design of Two-Phase Atomisers for Use in Combustion Furnaces," *Proc. ICLASS-85*, pp. 1A/3/1~1A/3/13.
- (4) Graziadio, M., Andreussi, P., Tognotti, L. and Zanelli, S., 1987, "Atomization of Coal-Water Fuels by a Pneumatic Internal Mixing Nozzle: Part I - Two-Phase Flow Inside the Nozzle," *Atomization and Spray Technology*, Vol. 3, pp. 187~208.
- (5) Andreussi, P., Tognotti, L., De Michele, G. and Graziadio, M., 1992, "Design and Characterization of Twin-Fluid Y-Jet Atomizers," *Atomization and Sprays*, Vol. 2, pp. 45~59.
- (6) Lee, S. Y., Park, B. S. and In, W. K., 1992, "Study of Flow Characteristics inside a Y-Jet Twin-Fluid Atomizer," *Proc. of the 2nd JSME-KSME Thermal Engineering Conference*, Kitakyushu, Japan, Vol. 2, pp. 2/199~2/204.
- (7) 인왕기, 이상용, 송시홍, 1993, "Y-jet 2-유체 분무노즐 내부유동의 모델링," 대한기계학회 논문집, 제17권, 제7호, pp. 1871~1850.
- (8) De Michele, G., Graziadio, M., Morelli, F. and Novelli, G., 1991, "Characterization of the Spray Structure of a Large Scale H.F.O Atomizer," *Proc. ICLASS-91*, Gaithersburg, MD, U.S.A., pp.

- 779~786.
- (9) Dodge, L. G., 1984, "Change of Calibration of Diffraction-Based Particle Sizers in Densed Spray," *Optical Engineering*, pp. 626~630.
- (10) Asali, J. C., Hanratty, T. J. and Andreussi, P., 1985, "Interfacial Drag and Film Height for Vertical Annular Flow," *AIChE Journal*, Vol. 31, No. 6, pp. 895~902.