

# PDPA를 이용한 기체주입미립화기의 미립화 특성에 관한 연구

김형곤<sup>†</sup>·矢野 利明<sup>\*</sup>·송규근<sup>\*\*</sup>·정병국<sup>\*\*\*</sup>·정재연<sup>\*\*\*</sup>·조태영<sup>\*\*\*\*</sup>

## A Study on the Atomization Characteristics of Effervescent Atomizer with PDPA

Hyung-gon Kim, Toshiaki Yano, Kyu-keun Song, Byong-koog Jung, Jae-young Jung and Tae-young Cho

**Key Words:** ALR(미립화공기/작동유체 질량유량 비), Effervescent atomizer(기체주입미립화기), PDPA(Phase Doppler Particle Analyzer), SMD(Sauter Mean Diameter)

### Abstract

An experimental study is performed on atomization characteristics and stable operating condition for injection of high viscous waste vegetable oil using effervescent atomizer with two aerator tubes. Consideration is given to the effects of ALR and liquid viscosity on the velocity and mean diameter of the injected droplet. It is found that (i) as ALR increases, the axial velocity of the droplet is increased, while half-velocity width and SMD are decreased regardless of the change in liquid viscosities, (ii) the rate of fine drop distribution occupied in the total spray field is increased with an increasing in ALR, and (iii) the effect of viscosity on atomization characteristics is minor.

#### 기호설명

ALR	미립화 공기/작동유체 질량유량 비
b	분무반폭, m
d	노즐 출구 오리피스 직경, m
D <sub>30</sub>	체적 평균입경, m
$\dot{m}_a$	미립화 공기의 질량유량, kg/s

$\dot{m}_l$	작동유체의 질량유량, kg/s
SMD	Sauter Mean Diameter, m
u	액적 축방향 평균속도, m/s
V <sub>c</sub>	미립화기의 혼합실 체적, m <sup>3</sup>
z	노즐 팁으로부터의 축방향 거리, m
$\theta$	노즐 출구 오리피스에서의 확산각, deg

### 1. 서론

1980년대 후반, Lefebvre et al.에 의해 제안된 기체주입 미립화기는 많은 응용분야에서 다른 종류의 미립화기 보다 더 양호하게 작동하기 때문에 많은 관심과 연구의 대상이었다. 선행 연구자들의 결과는 일반적인 압력, 회전, twin-fluid atomizers 에 대하여 기체주입 미립화기가 뛰어난 장점을 보이는 것을 나타냈다.

† 가고시마대학원, 일본  
E-mail :d0164004@mail.mech.kagoshima-u.ac.jp  
TEL :+81-99-285-8247 FAX :+81-99-285-8246

\* 가고시마대학 공학부

\*\* 전북대학교 공업기술연구소

\*\*\* 전북대학교 자동차신기술연구소

\*\*\*\* 전북대학교 대학원

Roesler and Lefebvre<sup>(1)</sup>, Lefebvre et al.<sup>(2)</sup>, Li et al.<sup>(3)</sup>는 ALR의 액적 크기에 대한 영향을 연구했다. Roesler and Lefebvre<sup>(1)</sup>의 연구결과는 낮은 ALR(0.001-0.005)의 범위에서 그리고 Lefebvre et al.<sup>(2)</sup>의 연구결과는 중간의 ALR(0.02-0.22) 범위에서 얻어졌다. 그러나 Li et al.<sup>(3)</sup>의 결과는 높은 ALR의 범위(0.15-0.85)에서 얻어졌다. 서로 다른 실험조건에도 불구하고, 모든 실험결과는 분무 SMD는 ALR의 비선형 함수인 것을 보인다.

김<sup>(4)</sup>등은 ALR의 변화에 대한 기체주입 미립화기의 혼합실 내부 유동특성과 외부 유동특성을 연구하였다. 그들은 혼합실 내부의 2상 유동특성과 외부유동과 분무에서의 평균입경을 관련 지어 설명하였다.

저자들은 발열량이 낮은 난연성 폐기물의 소각에 대한 연구를 하고 있다. 실제로 본 연구는 발열량이 낮은 폐소각물을 소각시키기 위하여 보조 연료로서 폐식용유를 소각로 내에 분사하기위한 예비실험으로서 진행되었다. 따라서 폐기물에 부유하는 고체에 의해 막힘을 방지하기 위하여 노즐 출구 오리피스 직경을 크게 설계하였으며, 액체의 질량유량은 이미 설계된 소각로에 시간당 처리용량에 알맞게 설정되었다. 본 연구에서는 ALR과 액체의 점성에 대한 액적 속도와 분무 평균 입경 특성을 고찰하고자 하였다.

## 2. 실험장치 및 실험방법

### 2.1 기체주입미립화기

본 연구에 사용된 기체주입미립화기의 개념을 Fig. 1에 보인다. 본 연구에서 사용된 기체주입미립화기는 1) 액체(물 또는 식용유) 공급포트, 2) 4개의 공기 공급포트, 3)액체(물 또는 식용유)의 흐름 속도로 가스가 기포화 되는 혼합섹션(Aerator tube) 그리고 4)공기와 식용유 및 공기와 물의 혼합물이 출구 오리피스 전에서 혼합되는 혼합실(Mixing chamber), 5)출구 오리피스(Exit orifice)로 구성된다.

액체는 상부의 포트를 통해 미립화기로 공급되어지고 aerator tube 내에서 출구 오리피스로 흐른다. 미립화 가스인 공기는 관통된 중심 튜브를 둘러싼 환형 챔버에 설치된 네 곳의 포트로부터 공급되어진다. 공기의 공급압력이 액체의 공기압력보다 약간 설정되어있기 때문에 가스는 구멍을

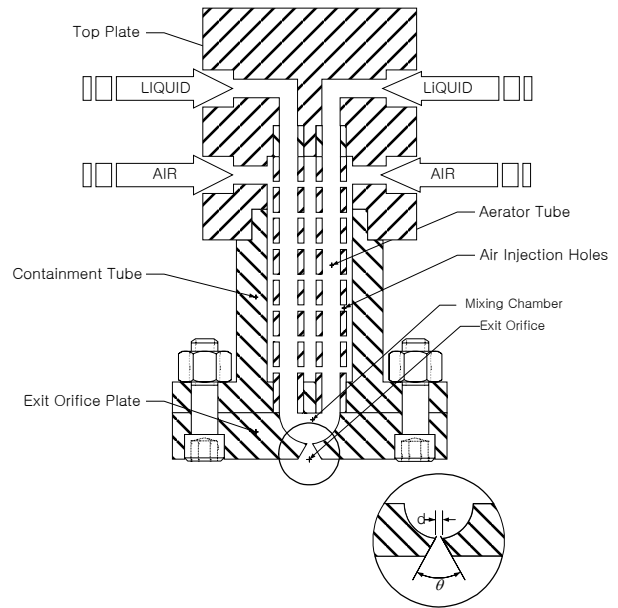


Fig.1 Schematic diagram of proposed effervescent atomizer

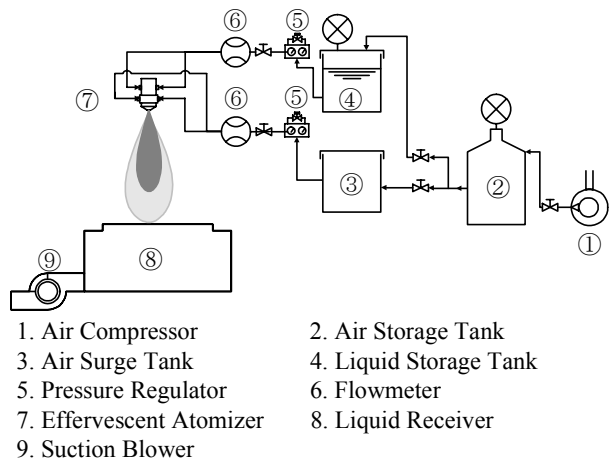


Fig. 2 Schematic diagram of experimental apparatus

통하여 중심 튜브에서 액체흐름으로 흐르고 기포를 형성한다. 중심 튜브의 내부의 동공은 혼합섹션의 역할을 이곳에서 공기와 액체가 1차 혼합된다. 형성된 기포류 2상 혼합물은 하류로 흐르고 출구 오리피스 직전에 설치된 혼합실에서 다시 공기와 식용유의 혼합물과 공기와 물의 혼합물이 2차 혼합된 후 출구 오리피스를 통해 배출되도록 설계되었다.

### 2.2 실험방법

본 실험을 수행하기 위한 실험장치의 구성을 Fig. 2에 나타낸다. 먼저 공기압축기①에 의해 압

축된 신선한 공기는 저장탱크②에 저장되며 유량계 ⑥를 통과한 후 노즐의 혼합실에서 액체(물, 식용유)와 혼합되도록 공급된다. 또한 공기압축기에 의해 가압된 탱크로부터 공급되는 식용유와 물은 유량계를 거쳐 노즐의 혼합실 안에서 공기와 혼합된 후, 노즐 출구를 통해서 정지 대기 중으로 분사되었다. 특히, 공기 공급관로의 중간에는 공기의 공급압력의 부조화에 의한 맥동현상을 방지하여 안정적으로 공기를 공급하기 위해 서어지 탱크③를 설치하였다.

노즐출구로부터 분사되는 분무 액적의 속도 및 크기를 동시에 측정하기 위해 본 실험에서 채택한 2차원 PDPA 시스템의 구성을 Fig. 3에 나타낸

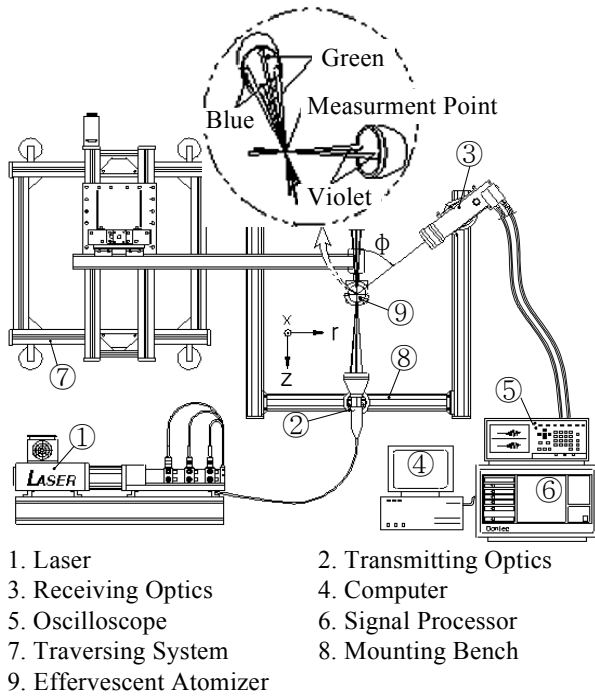


Fig. 3 2-D PDPA system

Table 1 Atomizer geometry

Exit orifice diameter(d)	2.5mm
Diffusion angle( $\theta$ )	90°
Volume of mixing chamber( $V_c$ )	$1.89 \times 10^{-5} m^3$

Table 2 Experimental conditions

Liquid	Water or Vegetable oil
Atomizing gas	Air
Liquid mass flow rate	2.8 g/s
Air mass flow rate	0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6 g/s
ALR	0.071, 0.107, 0.143, 0.179, 0.214

다. PDPA 시스템은 광학부, 신호처리기, 3차원 이송장치로 구성된다.

광학계는 송광부②,③(transmitting optics)와 수광부④,⑤(receiving optics)로 구성되어 있으며, 광원으로는 공냉식 Ar-ion 레이저(750mW)①를 사용하였다. 이때 사용된 송광부 렌즈의 초점거리는 310mm이었으며, 수광부 렌즈의 초점거리는 600mm이었다. 액적의 속도 및 크기를 계측하기 위한 측정체적⑩은 송광부에서 방사된 빔에서 나오는 2개의 파장 418nm(blue)와 514.5nm(green)가 서로 교차하여 형성되며, 이 부분을 통과하는 구형의 액적에서 굴절되는 산란광만이 수광부에서 검출되어 광 검출기에서 전기적인 신호로 변환되어 유효 데이터로서 저장되었다. 이때 산란광의 굴절각은 43°로 채택하였다.

이외에 주요한 보조장비로는 오실로스코프⑦, 신호처리장치⑧ 및 3차원 자동이송장치⑨가 있으며, 이들 장치는 실험 시 진동을 발생하지 않도록 test bench⑪에 견고하게 고정된 후 실험을 수행하였다.

Table 1은 노즐의 형상변수를 보이고 Table 2는 실험조건을 나타낸다.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 액적 축방향 평균속도

Fig. 4 (a), (b)는 각각 물과 식용유의 분무 축방향 단면 평균속도에 대한 ALR의 영향을 보인다. Fig. 4 (a)와 (b)로부터 노즐 출구 오리피스로부터의 거리가 동일한 단면에서 ALR이 증가함에 따라 분무 축방향 단면 평균속도도 증가되는 것을 알 수 있다. 이것은 미립화 가스인 공기의 유량이 증가할수록 액적에 더 큰 기체역학적인 drag force를 발휘하게 되고 결과적으로 액적들을 더욱 빠르게 하기 때문인 것으로 생각된다. 한편 동일한 ALR조건에 대해서, 축방향 평균속도는 노즐 출구 오리피스로부터 가까운 단면에서 더 크고 분무 하류 방향으로 갈수록 작아지는 경향을 보였다. 또한 분무 축방향 평균속도의 크기에 따라 전체 분무장을 상류(z=30, 50mm)와 하류(z=100, 150, 200mm)로 구분할 수 있다.

물의 경우(Fig. 4 (a)), 낮은 ALR의 범위 (ALR=0.071-0.107)에서 분무 축방향 단면 평균속

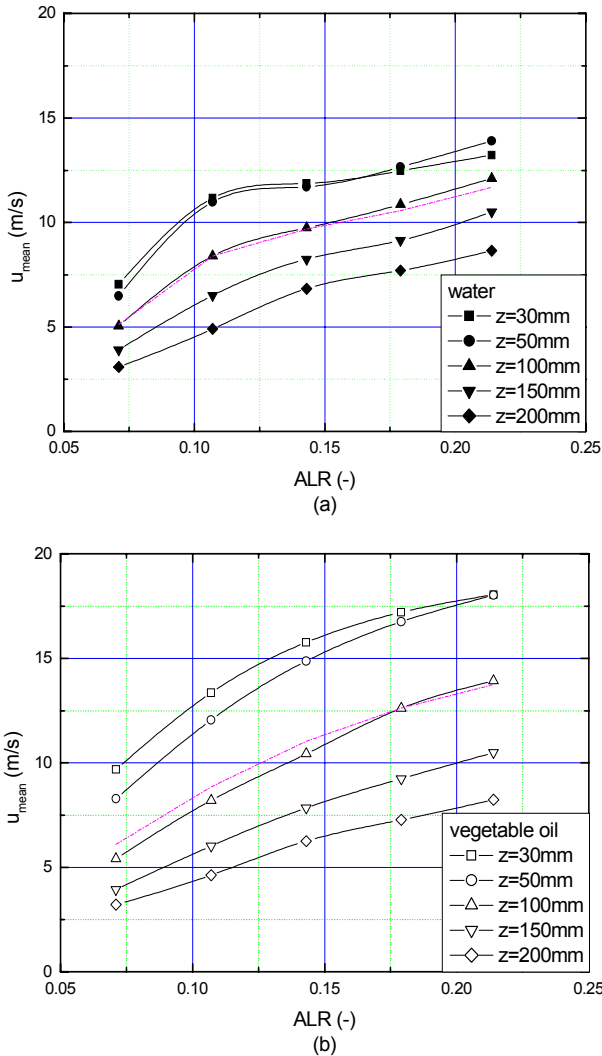


Fig. 4 Variation of axial mean velocity with ALR

도가 급격하게 증가되고 ALR이 더욱 증가 (ALR=0.107-0.179)하게 되면 다소 완만하게 증가 되는 경향을 보이고 있다. 식용유의 경우(Fig. 4 (b))는 대체적으로 전체적인 ALR의 범위에 대해 ALR이 증가할수록 분무 축방향 평균속도가 steady하게 증가하는 경향을 보인다. 위에서 구분한 분무 상류( $z=30, 50mm$ )에서의 식용유의 축방향속도가 물의 축방향속도보다 상당히 크게 나타나는 것을 볼 수 있다. 이것은 노즐 출구 오리피스에서 분사되는 식용유의 관성력에 의한 것으로 생각된다. 그러나 이러한 경향은 분무 하류로 갈수록 주위 공기의 저항이 더 크게 작용하여 물의 경우와 거의 유사한 경향을 보인다.

3.2 분무반폭

Fig. 5 (a), (b)는 각각 물과 식용유의 ALR 조건에 있어서 노즐 출구 오리피스로부터의 거리  $z$ , 에 따른 분무반폭 성장특성을 나타낸다. 분무반폭은 분무 중심축 방향의 최대속도의 1/2속도에 대응하는 분무 반경방향(+r방향)의 거리로 정의하였다<sup>(5)</sup>. 각 ALR조건에서 분무 하류 방향으로 갈수록 분무반폭이 증가하는 경향을 보인다. 또한 동일한 단면에서의 분무반폭은 ALR=0.071인 경우가 가장 크게 나타나고 있으며 ALR이 증가함에 따라 분무반폭은 감소하는 것으로 나타났다. 물의 경우(Fig. 5 (a)), ALR=0.071인 경우를 제외하면 ALR=0.107, 143, 179, 214의 경우는 ALR의 증가에 대한 분무반폭의 감소는 그다지 크지 않으며 분무반폭은 ALR=0.071에 비하여 급격히 줄

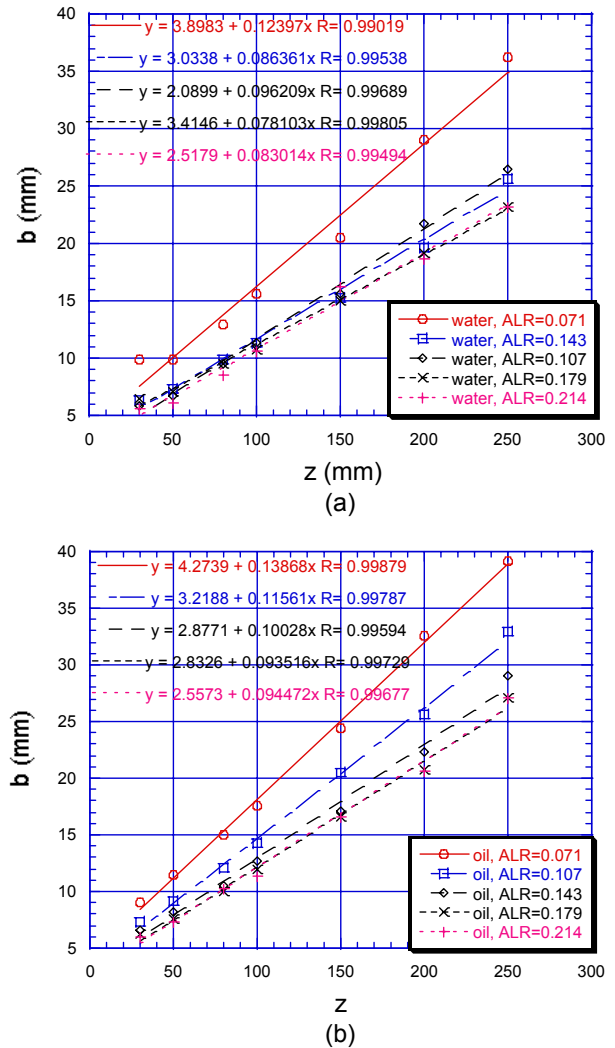


Fig. 5 Variation of half-velocity width with axial distance

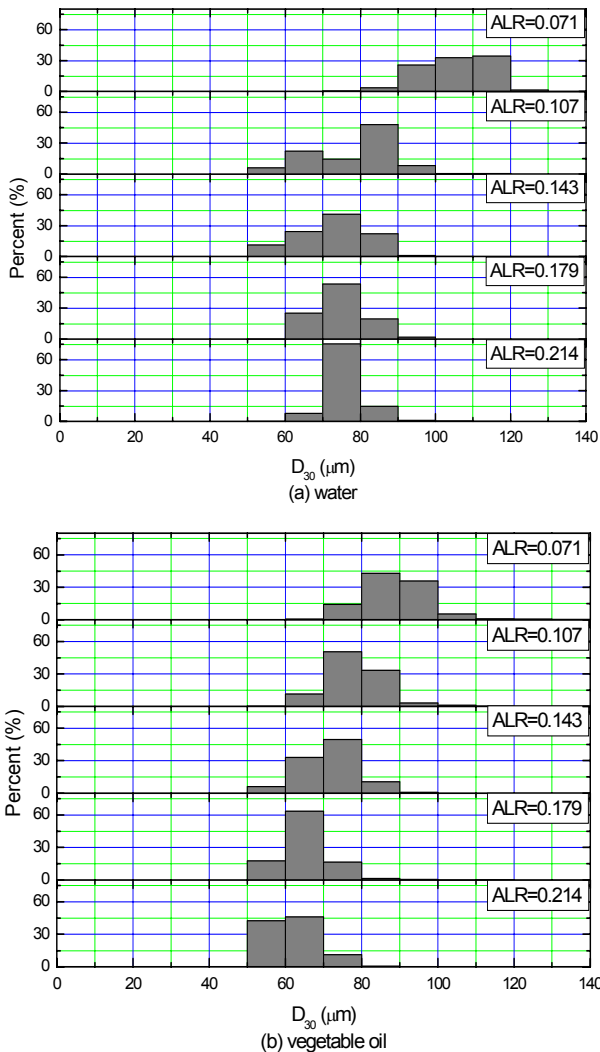


Fig. 6 Influence of ALR on drop size distribution

어드는 경향을 보이는데, 이는 분무 중심축 방향의 속도가 반경방향의 속도크기 보다 상당히 커 그에 따른 운동량이 훨씬 크기 때문인 것으로 생각된다. 식용유의 경우에도 ALR=0.071의 경우 분무반폭이 가장 크게 나타나지만 ALR이 증가함에 따라 분무반폭은 물에 비하여 완만하게 감소하는 경향을 보인다. 동일한 단면에서의 분무반폭은 물의 경우에 비하여 식용유의 경우가 약간 더 큰 것으로 보인다.

3.3 액적 평균직경

Fig. 6 (a), (b)는 각각 물과 식용유의 입경분포를 나타내고 있다. 그림에서 y축은 체적분율을 나타낸다. Fig. 6 (a)에서 알 수 있는 바와 같이 물은 ALR=0.071조건에서 100 $\mu$ m 이상의 입자들이

약 70% 정도 존재하고 80 $\mu$ m이하의 입자들도 약간(4.5%) 존재한다. ALR=0.107조건에서는 대부분이 100 $\mu$ m이하의 입자들이 존재하고 100 $\mu$ m이상의 입자들은 약 1% 정도만이 존재하고 있다. 그러나 ALR=0.214조건에서는 70-80 $\mu$ m사이의 입자들이 75% 정도 존재하며 100 $\mu$ m이상의 입자들이 소수(0.7%) 존재한다. Fig. 6 (b)에서 알 수 있는 바와 같이 식용유의 경우는 물의 경우보다 더 작은 입자들을 보여 대부분의 입자들이 100 $\mu$ m이하의 액적들로 존재하고 100 $\mu$ m이상의 입자들이 약간(7%) 존재하는 것으로 보인다. ALR이 증가할수록 미립화가 더욱 진행되어 ALR=0.179의 조건에서는 100 $\mu$ m이상의 입자들이 극히 소수(0.18%)만이 존재하고 ALR=0.214의 조건에서는 100 $\mu$ m

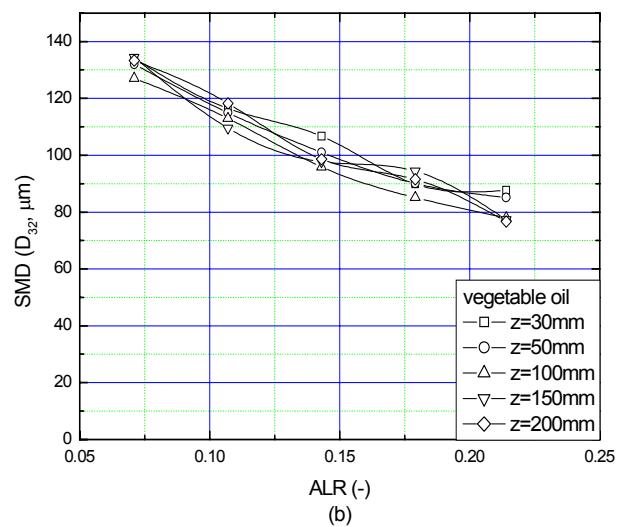
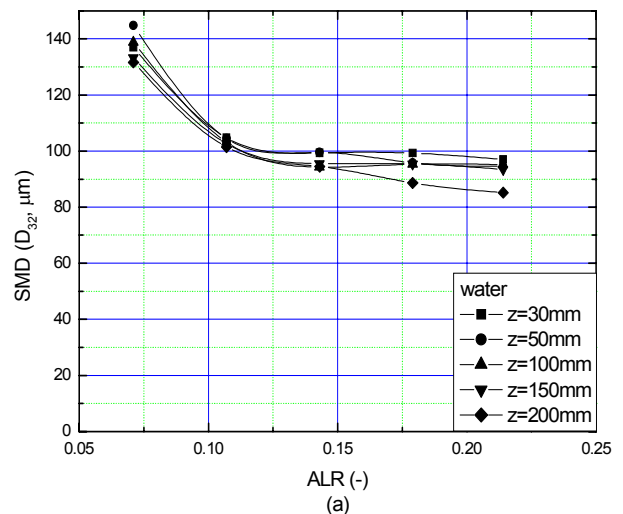


Fig 7 Influence of ALR on SMD

이상의 입자들은 전혀 보이지 않게 된다. ALR이 증가함에 따라 작은 입경을 갖는 액적들이 존재하는 상대적으로 많은 유량의 미립화 기체는 노즐출구 오리피스에서 중앙에서 빠른 속도로 분사되면서 두 상간의 상대 속도 차에 의한 운동량 교환에 의해 미립화가 진행되며 미세한 액적들이 생성하기 때문인 것으로 생각된다.

Fig. 7 (a), (b)는 각각 물과 식용유의 SMD에 대한 ALR의 영향을 보인다. Fig. 7 (a), (b)에서 보는 바와 같이 전반적으로 ALR이 증가함에 따라 SMD가 감소하는 경향을 보인다. 이는 언급된 바와 같이 ALR이 증가할수록 노즐 출구 오리피스에서 분사되는 미립화 기체의 속도가 빨라져 액적과의 상대 속도 차에 의한 운동량 교환에 의해 보다 미세한 액적들을 생성하기 때문인 것으로 생각된다. Fig. 7 (a)에서 볼 수 있는 바와 같이 물의 경우 낮은 ALR 범위(ALR=0.179-0.143)에서는 ALR이 증가함에 따라 평균입경이 급격하게 감소하고 이후 ALR이 더욱 증가함에 따라 완만하게 감소하는 경향을 보인다. 그러나 Fig. 7 (b)에서 볼 수 있는 바와 같이 식용유의 경우는 ALR이 증가함에 따라 평균입경이 모든 ALR 범위에서 steady하게 감소되는 경향을 보인다. 낮은 ALR의 범위에서 물의 SMD가 급격히 감소하는 것은 이 구간에서의 급격한 액적 속도변화와 관계가 있을 것으로 생각된다. 이미 Fig. 4 (a)에서 보인 바와 같이 이 구간에서의 액적 속도는 다른 구간의 속도변화 기울기보다 상당히 급격하고 따라서 노즐 출구 오리피스에서 분사되는 미립화 기체와의 상대속도차도 급격히 변화되어 SMD가 급격히 감소된 것으로 생각된다.

또한 작동유체의 점성의 변화가 SMD에 미치는 영향은 그다지 크지 않은 것으로 보인다. Fig. 7에서 보이는 바와 같이 물에 비해 식용유의 점성계수가 약 65배 정도이지만 SMD는 큰 차이를 나타내지 않는다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 고점성의 식용유의 분사를 위한 안정한 작동조건과 미립화특성을 고찰하기 위하여 액적 축방향 평균속도, 분무반폭, 액적크기분포와 SMD 등을 연구하였다.

액적 축방향 평균속도는 작동유체의 점성에 관

계없이 ALR이 증가함에 따라 증가하였다. 그러나 분무반폭은 ALR의 증가와 함께 증가하였으며 높은 ALR 조건에서의 증가폭은 작았다. ALR이 증가함에 따라 가스상과 액체상의 상대속도의 증가로 인하여, 전분무장에서 미세한 입자가 차지하는 분율이 증가하였다. 작동유체에 관계없이, SMD는 ALR이 증가함에 따라 감소하였다.

결론적으로, 고점성의 폐식용유를 소각로 내부에 분사하는 수단으로 제안된 기체주입미립화기는 특히, ALR=0.179, 0.214조건에서 뛰어난 미립화 성능을 보일 것으로 생각된다.

#### 참고문헌

- (1) Roesler TC, Lefebvre AH, Studies on aerated-liquid atomization, *Int J Turbo Jet Engines*, 1989; 6:221-230
- (2) Lefebvre AH, Wang XF, Martin CA. Spray characteristics of aerated-liquid pressure atomizer, *AIAA J Prop Power* 1988;4(4):293-298
- (3) Li J, Lefebvre AH, Rollbuhler JR, Effervescent atomizers for small gas turbines, *American Society of Mechanical Engineers*, 94-GT-495, 1994, 1-6
- (4) Kim JY, Lee SY, Identification of internal flow pattern in effervescent atomizers, *KSME Journal*, 2000, 24(2), 306-315
- (5) Lee SG, Rho BJ, Atomization characteristics in pneumatic counterflowing internal mixing nozzle, *KSME International Journal*, 2000, 14(10), 1131-1142
- (6) Lefebvre AH, *Atomization and sprays*, New York, Hemisphere, 1989
- (7) Sovani SD, Sojka PE, Lefebvre AH, Effervescent atomization, *Progress in Energy and Combustion Science*, 2001, 27, 483-5
- (8) Lund MT, Sojka PE, Lefebvre AH, Gosselin PG, Effervescent atomization at low mass flow rate. Part1: the influence of surface tension, *Atomization Sprays*, 1993;3:77-89
- (9) Panchagnula MV, Sojka PE, Spatial drop velocity and size profiles in effervescent atomizer-produced sprays, *Fuel*, 1999;9(2):729-741
- (10) Roesler TC, Lefebvre AH, Studies on aerated-liquid atomization, *Int J Turbo Jet Engines*, 1989; 6:221-230