

## 초임계압 보일러용 유화연료의 물성치와 분사압력이 분무특성에 미치는 효과

### The Effect of Property of Emulsified Fuel and Injection Pressure on the Spray Characteristics for Super-Critical-Pressure Burner

이인수\*, 정지원\*\*, 차건중\*\*\*, 김덕줄\*\*\*\*

I. S. Lee, J. W. Jung, K. J. Cha, D. J. Kim

#### Abstract

The purpose of this study is to investigate the effect of the volume fraction of water and injection pressure on the spray characteristics of water/oil emulsified fuel injected from the pressure swirl atomizer. The mixture of light oil and water by using impeller mixer was performed. The spray characteristics such as SMD and velocity were measured using PDPA. The injection pressures were 7.5, 100, 200 and 300kg/cm<sup>2</sup> and volume fractions of water in emulsified fuel were 0, 10, 20 and 30%, respectively. The measurement sections were at 30, 60 and 90mm from injection nozzle tip. SMD and velocity of emulsified fuel were larger gradually by increasing the volume fraction of water in emulsified fuel. The spray angle was decreased and axial velocity was increased with increase in water content. It was found that the relative SMD ratio was increased more greatly than the relative axial velocity ratio in super critical pressure. The relative SMD ratio was increased and the relative axial velocity ratio was decreased with increase injection pressure at spray downstream.

**주요기술용어:** Emulsified fuel(유화연료), SMD(자우타 평균입경, Sauter Mean Diameter), PDPA(위상 도플러 입자분석기), Relative SMD Ratio(상대평균입경비), Super Critical Pressure(초임계압)

#### 1. 서 론

연소기 분야에서 고 유가시대의 에너지 문제와 심각한 대기공해 문제를 해결하기 위해 에너지

절약 및 환경 친화적 연소기의 개발이 시도되고 있다. 그러나 기존의 시도들은 대부분 기존의 공기와 연료의 최적 공연비 제어, 배출가스 후처리 시스템의 개선 등을 통해 이루어지고 있다. 이러한 방법으로서의 에너지 절약의 효과가 크지 못하고, 점차 강화되는 환경규제를 만족시키기에 한계가 있다.

그 외 대체 연료를 이용한 연소방식도 소개되고 있다. 특히 물과 액체 연료와의 혼합에 의한 에멀전 연료의 연소가 한 부분에 속한다.

\* 부산대학교 대학원 기계공학과  
\*\* 부산대학교 대학원 기계공학과  
\*\*\* 부산대학교 기계기술연구소  
\*\*\*\* 부산대학교 기계공학부

그러나 이 방식도 예열된 연료는 액체의 포화 상태 이하에서 연소하기 때문에 물의 잠열로 인한 열손실의 감소, 연소의 불안정 그리고 물의 낮은 혼합비로 인한 비경계성 등으로 실용화되지 못하고 이론에 머물고 있다.

이에 반해 본 연구에서 시도한 고온고압 혼유 연소기는 임계압이상, 임계온도 이상의 고온 고압하 조건에서 물과 액체 연료의 혼합유를 연소시키는 연소기이다. 이는 열역학적으로 임계점 이상의 압력과 고온 온도에서 액상이 기상화 되고 물이 열분해되는 현상을 연소기에 적용하는 것이다.

물과 기름의 혼합유가 임계점 이상에서 기상화 될 때 물은 잠열의 손실이 없어지고  $H_2O$ 는 수소와 산소로 열분해 됨으로서 기상화 연소가 가능하게 된다. 그러므로 물의 수소성분을 연료로 사용하게 됨으로서 기름의 사용량은 그만큼 절약하게 되어 에너지 절약효과를 기대할 수 있고, 따라서  $CO_2$ 의 발생도 줄이게 된다.

수소는 물의 열분해에서 발생된 산소로 재 연소를 가능하게 하며, 외부 공급 공기량은 절약된 기름의 양에 준하는 연소용 공기만을 공급하기 때문에 부가적인  $NO_x$ 의 발생을 현저히 저하시킬 수 있다.

따라서 PCB와 같은 다이옥신 발생 가능 물질을 소각시킬 때 다이옥신 발생 가능 온도 범위를 벗어난 고온 연소가 가능하여 폐기물의 소각 시 다이옥신 배출이 거의 없는 청정 연소를 실현시킬 수 있다.

따라서 본 연구에서는 초임계 현상을 응용한 에너지 절약 및 환경친화적 저공해, 고성능 연소기 개발에서 연소 분무특성을 알아보기 위해 액체연료를 상온으로 고정하고, 분사압력은 7.5, 100, 200, 300 $kg/cm^2$ 으로 하였고, 사용유체는 순수경유와 여기에 함수율이 10, 20, 30%인 유화 연료를 사용하였으며 계면활성제는 전체 체적비의 2%를 섞었다. 이러한 조건으로 함수율과 압력 변화가 추방향속도, 자우터평균입경 등의 분무특성에 미치는 영향을 연구하였다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 실험장치

Fig. 1은 본 연구에 사용된 실험장치를 나타낸다. 본 연구에 사용된 실험장치의 구성은 분사계, PDPA시스템 및 가시화 장치로 구성된다. 분사계는 분사노즐, 펌프, 송풍기, 대형수조, 정수필터, 분사압 조절을 위한 밸브와 특허, 온도조절의 정확성을 얻기 위해 냉동기 등으로 구성되어 있다.

PDPA 시스템은 레이저, 송광부, 수광부, 신호처리기, 3차원이송장치, PC 등으로 이루어져 있다. 분사계는 펌프와 대형수조를 배관으로 연결하여 순환식으로 작동유체인 유화연료를 공급하도록 설치하였으며 균일한 액적으로 측정하기 위하여 펌프와 노즐사이에 정수필터를 설치하였다.

PDPA시스템에서 레이저는 He-Ne 레이저(최대출력 10mW)가 사용되었다. 입경의 측정 범위와 측정 체적을 고려하여 송광렌즈의 초점거리를 500mm로 설정하였으며, 수광렌즈의 초점거리는 입경 분해능을 고려하여 500mm로 설정하였다.

가시화 장치는 Nikon FM2 camera에 105mm 중렌즈를 부착하여 스트로브스코프를 광원으로 한 고속순간 촬영법을 이용하여 측정했다.

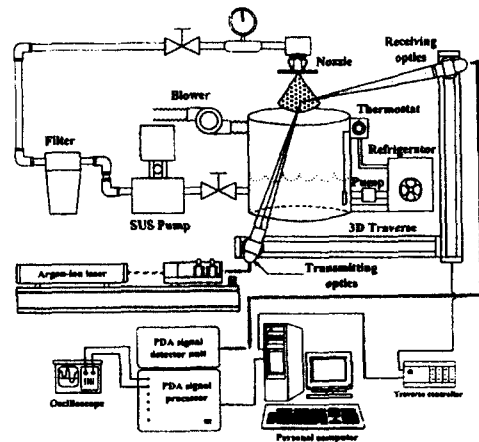


Fig. 1 Schematic diagram of experimental set-up

Fig. 2는 본 연구에 사용된 노즐의 개략적인 형상을 나타내고 있다. 위의 그림은 전체적인 형상을 나타내고, 아래 그림은 단면도를 나타낸 그림이다. 압력식 단공 노즐로서 분사압력이  $7.5\text{kg}/\text{cm}^2$  일 때 분사량이  $1.5\text{gal}/\text{h}$ 인 상용보일러 노즐을 사용하였다.

연료가 분사노즐로 유입된 후 필터를 지나 throat hole을 통과한 후 오리피스를 통해 분사가 행하여지는데, 이 때 throat hole 3개가 방사상으로 존재하므로 triple jet를 형성하여 노즐 오리피스를 통과하면서 충돌분무 효과가 나타난다.

throat hole은 노즐의 축방향에 대해서  $15^\circ$  정도 경사져 있어서 약간의 와류도 형성한다.

이와 같은 요소들의 복합적인 영향에 의해 분무 형태는 반중공형(semi-hollow cone) 형태를 나타낸다.

## 2.2 유화연료의 제조

본 실험에서는 회전체를 이용한 Impeller Mixer 유화기와 유화제를 같이 사용하여 유화연료를 제조하였다. 유화연료는 연료속에 분무된 물 입자의 분산을 좋게 하고 혼합을 양호하게 하기 위해 impeller를 용기 양쪽에 설치하였다.

네 개의 날개각은  $45^\circ$ 로 하고 회전 방향은 각각 반대로 설정하였다. 구동은 DC MOTOR에 의

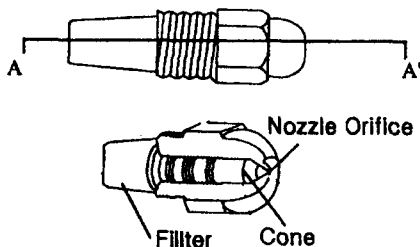


Fig. 2 Schematic of nozzle shape

해 구동된다. 회전수는  $2000\text{rpm}$  이다. 10분간 경유, 물, 계면활성제를 혼합하여 제조하였다.

유화연료의 제조에 있어 가장 중요한 문제는 유화연료의 안정성이다. 안정성에는 연료의 종류, 온도, 물 첨가율, 계면활성제의 종류와 첨가율, 유화연료 제조장치의 원리와 조건, 용기의 성질과 크기 등이 크게 영향을 미친다.

유화연료가 안정되지 못하면 분무가 불균일해지고 재현성이 떨어져 제어하기가 어려운 점이 있다.

계면활성제는 SPAN 80 (showa chemicals, HLB=4.3) 75%와 TWEEN 85(Yakuri Pure Chemicals, HLB=11) 25%를 혼합하여 사용하였다.

분무특성에 미치는 계면활성제의 양은 2%의 체적비로 고정시켰다. 유화연료는 물을 10, 20, 30% 세 종류의 체적비로 함유하여 제조하였다.

## 2.3 실험방법

측정위치는 노즐 분무축 하방향(z)으로 30, 60, 90mm에서 반경방향(r)으로 4mm 간격으로 분무가 분포하는 위치까지 측정하였다. 액적의 방향 속도 성분을 U, 액적의 크기는 자우타 평균 직경(SMD)으로 나타내었다.

본 실험은 대기압 상태의 밀폐된 공간에서 행하였다. 물의 함량에 따른 분무입경과 속도를 측정하기 위하여 유화 연료내 물의 함량을 0-30% 까지 10%간격의 체적비로 계량하였다.

분사압력에 따른 분무입경, 축방향속도 측정을 위하여 분사압력은  $7.5, 100, 200, 300\text{kg}/\text{cm}^2$  로 하였다. 분무입경과 축방향속도는 한 측정위치에서 1회에 10000개의 액적을 획득하여 측정하였고 5회 반복측정 하여 데이터의 정확도를 높였다.

실험에 사용한 용액의 특성은 Table 1에 나타내었다. 사용유체는 순수경유( $W_{0\%}$ )와 물의 첨가 비율에 따라 물함유량 10% ( $W_{10\%}$ ), 물함유량 20%( $W_{20\%}$ ), 물함유량 30%( $W_{30\%}$ ) 4가지 이다.

Table 1 Viscosity of test fluids

Fluids Properties	W <sub>0%</sub>	W <sub>10%</sub>	W <sub>20%</sub>	W <sub>30%</sub>
Viscosity of Coefficient $\mu$ (cp)	4.94	8.57	11.30	15.93

3. 실험결과 및 고찰

3.1 분무의 가시화

Fig. 3과 Fig. 4는 분사압력이 각각 7.5, 100, 200, 300kg/cm<sup>2</sup>일 때 순수경유와 물함량 30%일 때 상용 보일러 노즐의 분무 형상을 각각 가시화한 것이다.

분무형상은 노즐의 출구에서 축하방향으로 나타낸 것이다. 본 실험에 사용된 노즐은 압력식 단공 노즐로써 중심이 비어있는 semi-hollow cone 형태이다. 노즐팁 근방에서 원추형 액막이 형성되고, 점점 분무 축하방향으로 퍼져 나가면서 얇은 막으로 발달하고, 막이 찢어져 작은 액적들이 형성되는 것을 알 수 있다.

Fig. 3은 순수경유에서 분무 축하방향으로 100mm까지 전체적인 분무형상을 가시화한 것이다. 분사압력이 증가할수록 노즐 팁으로부터 영역 전체에 걸쳐 분무각이 점점 작아짐을 알 수 있다.

특히 분사압력이 7.5 kg/cm<sup>2</sup> 일때는 분무각이 크나, 300kg/cm<sup>2</sup>의 초임계압 상태에서는 분무각이 작게 나타났다. 액적의 수밀도는 7.5 kg/cm<sup>2</sup>의 경우는 연료가 회박한 상태로 존재됨을 알 수 있고, 압력이 점점 증가함에 따라 액적의 수밀도는 높아지면서 농후한 상태를 볼 수 있다.

Fig. 4는 물함유량이 30%인 유화연료를 분사압력에 따라 선단거리 90mm까지 분무형상을 가시화한 것이다. Fig. 3의 순수경유에서의 액적의 수밀도와 비교했을 때 조금 회박한 상태의 현상을 나타내고 있다. 또한 순수경유보다 물함유량

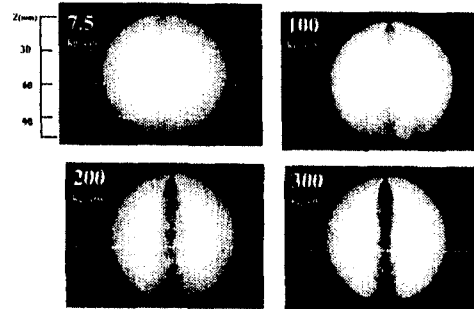


Fig. 3 Visualization of spray with injection pressure (W=0%)

이 30%일 경우가 동일한 분사압력에서 분무각이 다소 컸다.

3.2 물함유량에 따른 분무특성

Fig. 5은 선단거리 Z=90mm에서 물함유량에 따른 반경방향의 평균 입경을 나타낸 것이다. 물함유량이 증가하면 평균입경이 증가한다. 이것은 물함유량이 증가하면 유화연료의 점성이 증가하기 때문이다. 그러나 압력이 300kg/cm<sup>2</sup> 일 경우는 7.5kg/cm<sup>2</sup>에 비하여 물함유량의 영향이 적게 나타났고 분무폭도 작았다. 또한 반경방향으로 갈수록 평균입경이 커지는 것은 분무의 형상이 반동공 원추형이기 때문이다.

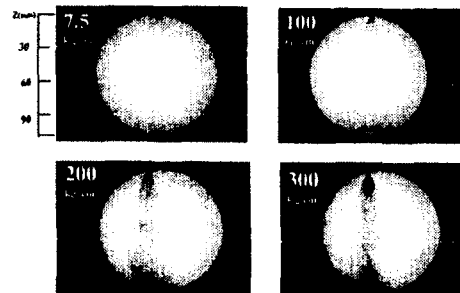


Fig. 4 Visualization of spray with injection pressure (W=30%)

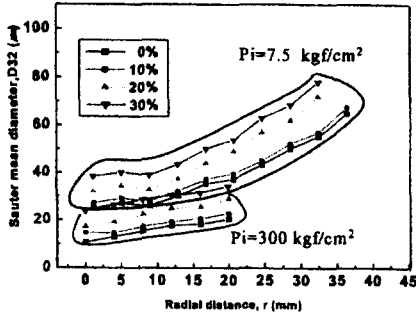


Fig. 5 SMD with water content (Z=90mm)

Fig. 6은 선단거리 Z=90mm에서 반경방향에 대하여 축방향 속도를 나타낸다. 분사압력이 증가되면 축방향 속도는 현저하게 증가되었다. 또한 반경방향으로 갈수록 축방향 속도도 증가하였다. 이것은 노즐 형상이 반동공 원추형이기 때문이다. 물함유량이 증가할수록 축방향 속도가 크게 증가한 것은 점성의 증가에 의한 축방향 모멘텀의 증가로 사료된다.

### 3.3 선단거리에 따른 분무특성

Fig. 7은 선단거리에 따른 분무 반경 방향으로의 상대평균 입경비를 나타낸 것이다. 상대평균 입경비에는 순수경유의 SMD에 대한 물함유량 30% SMD의 비로 나타낸다.

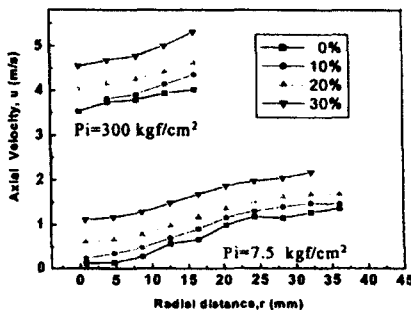


Fig. 6 Axial velocity with water content (Z=90mm)

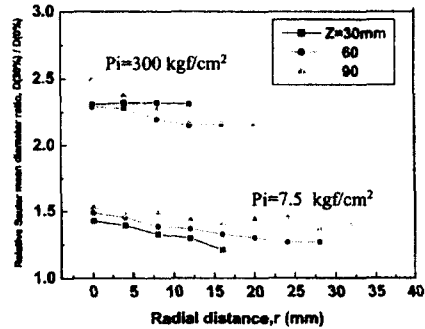


Fig. 7 Relative SMD ratio with axial distance

반경방향으로 갈수록 순수경유와 물함유량 30%의 입경비, 즉 상대평균 입경비가 점점 작아졌다. 이것은 축 중심에서 반경방향으로 갈수록 물함유량 30%의 경우가 순수경유보다 입경의 증가폭이 적어지기 때문이다.

초임계압 조건에서는 선단거리에 관계없이 저압일 경우보다 상대평균 입경비가 훨씬 컸다. 이것은 초임계압 조건에서는 저압에 비하여 연료의 물성치가 영향이 커서 순수경유의 입경이 작은 반면에 물 30%가 함유된 연료는 상대적으로 입경이 컸기 때문이다.

Fig. 8은 선단거리에 따른 분무 반경 방향으로의 상대축방향 속도비를 나타낸 것이다.

상대축방향 속도비는 순수경유의 축방향 속도에 대한 물함유량 30%의 축방향 속도의 비로 나타낸다.

초임계압에서 선단거리에 따른 반경방향으로 속도변화는 거의 일정하였다. 이것은 초임계압에서 축방향 속도는 연료의 점성 영향 보다 강한 축방향 모멘텀의 영향이 컸기 때문으로 사료된다.

저압의 경우 반경방향으로 상대축방향 속도비가 현저히 감소하였다. 이것은 순수경유의 경우가 반경방향으로 갈수록 축방향속도가 상대적으로 증가하였기 때문이고, 그 영향은 하류에서 가장 심하였다. 초임계압의 경우가 저압일 때보다는 상대축방향 속도비가 낮다. 이것은 초임계압의 경우는 저압에 비하여 점성에 의한 영향이 작고 축방향 속도가 상대적으로 크기 때문이다.

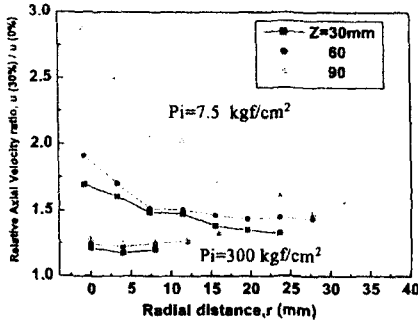


Fig. 8 Relative axial velocity ratio with axial distance

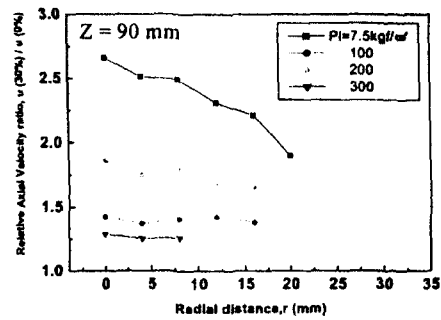


Fig. 10 Relative axial velocity ratio with injection pressure

### 3.4 압력변화에 따른 분무특성

Fig. 9은 선단거리 Z=90mm에서 분사압력 변화에 따른 반경 방향으로의 상대평균 입경비를 나타낸다. 반경방향으로 갈수록 상대평균 입경비가 감소하며 압력이 증가할수록 더욱 심하다. 이것은 Z=90mm의 하류에서는 순수경유의 입경은 작아지고 반경 방향으로는 점점 증가하나 물 30% 함유된 경우는 입경의 증가폭이 상대적으로 작았기 때문이다. 또한 압력이 증가할수록 순수 경유의 입경은 더욱 작아지나 물 30% 함유된 경우는 그다지 작아지지 않기 때문이다.

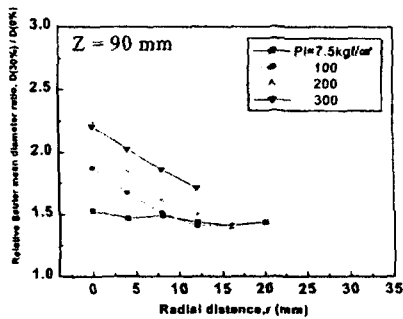


Fig. 9 Relative SMD ratio with injection pressure

Fig. 10은 선단거리 Z=90mm에서 분사압력 변화에 따른 반경 방향으로의 상대축방향 속도비를 나타낸다.

반경방향으로 갈수록 상대축방향 속도비가 감소하고, 분사압력이 증가할수록 분무각도가 작아진다. 이것은 압력이 낮을 때는 순수경유의 축방향속도가 상대적으로 낮아 그 변화가 심하게 나타났으나, 압력이 증가하여 초임계압이 되면 그 영향이 적기 때문이다.

### 4. 결론

압력단공노즐(Semi-Hollow cone)을 이용하여 분무형상을 가시화하고 유체의 분사압력과 물함유량, 선단거리를 변화시켜 분무특성을 연구한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 물 함유량의 증가에 따른 입경과 축방향 속도의 증가는 분사압력이 초임계압에서도 그대로 유지하였다.
2. 초임계압하에서 상대평균 입경비는 크게 (230%) 증가하였으나, 상대축방향 속도비는 약간 (130%) 증가하였다.
3. 분무하류 (Z=90mm)에서 압력이 증가할수록

상대평균 입경비는 커지는 반면 상대축방향 속도 비는 작아졌다.

### 참고문헌

1. Lefebvre, A. H., "Atomization and Spray", Hemisphere publishing Co., 1989
2. Hirai and Nagai, "Effects of Fuel Spray Nozzles on Combustion Characteristics of a Combustion," JSME, Vol. 574, pp236-24, 1993
3. Inamura and Hirai, "Spray Flow Characteristics in Air Blast Atomization" JSME, Vol. 541, pp.338-394, 1991
4. Minoru Tuskahara and Yasufumi Yoshimoto, "Influence of Emulsified Fuel Properties on the Reduction of BSFC in a Diesel Engine", SAE Paper No. 891841, 1989
5. Evers, L. W., "Characteristics of the Transient Spray from a High Pressure Swirl Injector", SAE Paper, No. 940188, 1994
6. Dombrowski, N. and Hasson, D., "The Flow Characteristics of Swirl Spray Pressure Nozzles with Viscosity Liquid", *AICHE Journal*, IS, pp. 604-611, 1969
7. Shuichi Kajitani, "A Study on Gasoil - water(W/O Type) Emulsified Fuel (The Effects of Lapse of Time on the Spray Characteristics)", *日本機械學會 論文集(B編)* 56卷 531号, 1990
8. Dryer, F.R., "Water Addition to Practical Combustion Systems-Concepts and Applications", Sixteenth Symposium on Combustion, pp.279-295, 1977
9. J.V. Droughton, et al, "The Effect of Ultrasonic Mixing of the Fuel on the Performance of an Internal Combustion Engine", SAE Paper NO. 840238, 1984.
10. Zhao, F., Yoo, J., Liu, Y. and Lai, M., "Spray Dynamics of High Pressure Fuel Injectors for DI Gasoline Engines", SAE Paper, No. 961925, 1996