

# 압력선회노즐에서 물-기름 유화연료의 분무특성

## Spray Characteristics of Water/Oil Emulsified Fuel in Pressure-Swirl Nozzle

임정현\*

노수영\*\*

J.H.Rhim

S.Y.No

### ABSTRACT

The beneficial aspects of applying emulsion fuels to combustion systems may be due to the changes of fuel properties which lead to the enhanced atomization characteristics. The spray characteristics of water/oil emulsified fuel injected from the pressure-swirl(simplex) atomizer using for oil burner were investigated. Four different water contents from 10 to 40 % by volume at 10% increment were prepared by mixing with the different contents of surfactants. Total amount of surfactant used was varied from 1 to 3 % by volume. This study demonstrates the influence of water and surfactant contents of emulsified fuel, injection pressure on the spray characteristics, i.e. Sauter mean diameter(SMD) and spray angle. The drop size distribution of the emulsified fuel spray was measured with a Malvern particle sizer. In order to measure the spray angle, the digital image processing was employed by capturing multiple images of the spray with 3-CCD digital video camera.

It was evident that the addition of water and surfactant changes fuel properties which are the key parameters influencing the atomization of the spray. The increase in surfactant content results in the decrease of SMD and the increase in spray angle. The droplets decrease with increase in injection pressure, but the influence of injection pressure in this experimental condition was less important than expected. The more viscous fuel with the increase of water content exhibits the larger droplets in the centerline of the spray, and the less viscous fuel in the outer edges of the spray. The increase in axial position from the nozzle causes the spray angle to decrease. The spray angle decreases with increase in water content. This is due to increase in viscosity with increase in water content.

주요기술용어 : water/oil emulsified fuel(물/기름 유화연료), surfactant(계면활성제),  
SMD(사우터 평균입경), spray angle(분무각)

### 1. 서론

최근 화석연료로 인한 이산화탄소 배출의 증가로 야기된 지구 온난화는 심각한 문제로 제기되고 있다. 또한 근래의 연소장치들은 유해 배출물을 줄이기 위해 고안되고 있다. 연료소

비를 줄이는 것과 마찬가지로 유해배출물을 줄이는 것은 이 분야의 연구자들이 목표로 하는 것이다.

유해배출물의 감소와 연료경제성을 위해 액체연료 연소기에 유중수적형 유화연료(water in oil emulsified fuel)를 이용하는 연구가 진행되어 왔다. 유화연료의 연소에 관한 연구는 유화연료 액적의 미세폭발(microexplosion)과 증

\* 정희원, 충북대학교 농업기계공학과 대학원

\*\* 정희원, 충북대학교 농업기계공학과

발[1~5] 그리고 유화연료의 분무화염[6]에 대해 중점적으로 연구되었다. 유화연료의 응용분야로는 자동차용 디젤엔진[7,8], 발전용 디젤엔진[9], 가스터빈[10], 연소로[11]등에 이용된다.

반면에 유화연료의 미립화나 분무특성에 관한 연구는 드물다. Nagai 등[12]은 이유체노즐과 공동유체분산기를 조합하여 유화연료의 미립화, 혼합, 분열에 대해 연구하였다. 또 Zhou와 Thorp[13,14]는 순수 경유와 유화연료의 미립화에 대해 실험적인 연구와 이론적인 연구를 행하였고 연료의 연소에 미치는 유화연료 미립화의 영향에 대해 논의하였다.

압력선회 분무기 (pressure-swirl atomizer, simplex atomizer)는 보일러, 로켓등의 분야에서 널리 사용된다. 압력선회 분무기의 미립화의 질을 지배하는 주요소로는 액체조성, 액체가 분사되는 공기 또는 가스의 물리적 성질, 액체 분사압력, 미립화기의 치수이다. 압력선회 분무기의 액적크기분포, 분무각, 분무선단관통 거리에 대한 위에 제시한 요소들의 영향은 문헌에 요약되어 있다[15,16].

본 연구에서는 시설원에 난방에 응용할 수 있는 유화연료장치의 개발을 위해 물함량, 계면활성제함량, 분사압력의 변화에 따른 유화연료의 미립화특성에 대해 조사하였다.

## 2. 재료 및 방법

### 2.1 실험장치

실험장치의 개략도를 Fig. 1에 나타내었다. 시험연료인 유중수적(water-in-oil)형 유화연료는 버너에 의해 노즐(Hago, 3.50 45H)로 분사된다. 노즐은 심플렉스 스윙 형태의 노즐이며 노즐은 수직, 수평으로 이동되는 이송장치에 수직으로 장착된다. 유화연료는 대기중에 분사압력 0.8~1.2MPa로 아랫방향으로 분사된다.

### 2.2 액적크기 측정

분무된 유화연료의 액적크기는 직경 10mm의 He-Ne 레이저(5mW,  $\lambda=632.8\text{nm}$ )를 이용하는 Malvern 입자측정기(Mastersizer S)로 측정하였다. 렌즈는 측정되는 액적크기에 따라 선정되어야 하므로 이 실험에서는 300mm 렌즈를 사용하였다. 그리고 Rosin-Rammler 분포방정식을 사용되었다.

액적크기 측정시 측방향과 반경방향 위치는 몇 가지 사항을 고려하여 선택하여야 한다. Obscuration은 다중산란이 일어나지 않도록 Felton 등[17]의 허용범위(5~50%)내에 유지되도록 하였다. 300mm 렌즈의 경우 차단점(cut-off point)은 비네팅(vignetting)을 피하기 위해 36mm로 제한된다. 또 렌즈가 젖지 않도록 주의하여야 한다. 따라서 이 실험에서는 이러한 조건에 부합하도록 액적크기 측정위치를

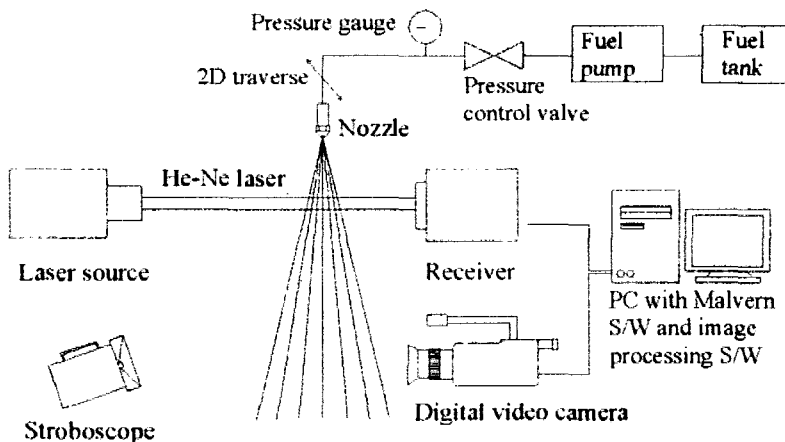


Fig. 1 Schematic diagram of experimental setup

축방향거리 10~50mm와 반경방향거리 ± 36mm로 하였다.

### 2.3 분무각 측정

분무각의 측정을 위해서 디지털 비디오 카메라와 프레임그래버보드(frame grabber board)를 이용한 디지털 영상처리법이 이용되었다. 광원으로는 스트로보스코프(stroboscope)가 사용되었다. 디지털 비디오 카메라에 의해 얻어진 영상은 분석을 위해 컴퓨터에 저장되고 PHOTOSHOP 이미지 소프트웨어를 이용하여 분석하였다. 분무각은 노즐끝에서부터 100mm까지 측정하였다.

### 2.4 유화연료의 제조

이 실험에서 사용된 경유의 밀도, 표면장력, 동점도는 각각  $812.4\text{kg/m}^3$ ,  $2.62 \times 10^{-2}\text{N/m}$ ,  $2.4 \times 10^{-6}\text{m}^2/\text{s}$ 이다. 유화연료는 고속믹서(Tokushu Kika Kogyo, M Spec B)로 6000rpm에서 10분간 경유, 물, 계면활성제(surfactant)를 혼합하여 제조하였다. 계면활성제는 SPAN 80 (Showa Chemicals, HLB=4.3) 75%와 TWEEN 85(Yakuri Pure Chemicals, HLB=11) 25%를 혼합하여 사용하였고 이때의 HLB(Hydrophile-Lipophile Balance)값은 5.95였다. 분무특성에 미치는 계면활성제의 영향을 알아보기 위하여 사용되는 계면활성제의 양을 체적비로 1~3%로 변화시켰다. 유화연료는 물을 체적비로 10~40%사이에서 10%씩 증가시켜 제조하였다.

### 2.5 유화연료의 물성치

유화연료의 물과 계면활성제의 함량변화에 따른 표면장력과 점도는 각각 표면장력계(Koyowa Interface Sci. CBVP-A3)와 점도계(Tokyo Keiki, B8H)로 측정하였다. Figure 2는 이 실험에서 사용된 유화연료의 물과 계면활성제 함량에 따른 밀도, 표면장력, 점도의 변화를 보여준다. 이 그림으로부터 유화연료의 물함량이 많은 경우(30, 40%) 계면활성제 함량의 작은 변화에도 표면장력과 동점도가 크게 변화함을 알 수 있다. 이는 계면활성제의 첨가가 분무의 미립화에 영향을 주는 주요변수인 연료의

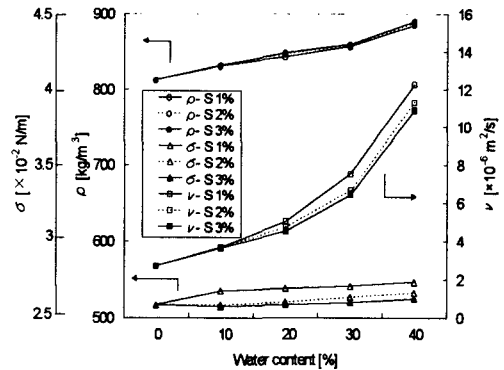


Fig. 2 Properties of emulsified fuel used

조성을 변화시킨다는 것을 의미한다.

유화연료의 밀도는 물함량의 증가에 따라 계속적으로 증가하고 계면활성제 함량에 그다지 큰 영향을 받지 않는다. 유화연료의 표면장력에 미치는 물함량의 변화는 무시할 수 있다.

유화연료의 동점도는 그림 2에서와 같이 물함량의 증가에 따라 현저하게 증가함을 알 수 있다. 물함량 40% 유화연료의 동점도는 순수한 경우의 동점도보다 약 6배정도 크게 나타났다. 액체의 점도가 크면 SMD는 커지고 분무각은 감소한다[16].

## 3. 결과 및 고찰

유화연료의 시간에 따른 안정성과 미세구조도 조사하였다. 혼합된 유화연료의 외관은 우유빛이고 2주정도의 안정성을 지녔다. 경유내의 물입자의 SMD는 물함량 10~40%, 계면활성제 1~3%에서 5~15 $\mu\text{m}$ 의 크기였다.

Figure 3은 분사압력이 1.0MPa일때 물함량 30%, 40%, 축방향거리 10mm, 50mm에서 SMD에 미치는 계면활성제함량의 영향을 나타낸 것이다. 미립화기의 하류에서의 액적크기분포는 공해배출물 형성에 중요하다. 압력선회분무기에서 그을음(soot)형성 영역은 미립화기 근처의 연료가 많은 영역에 나타난다[8]. 이 그림으로부터 계면활성제함량이 증가하면 SMD가 감소하는 것을 알 수 있다 이것은 SMD에 미치는 점도의 영향에 의해 설명될 수 있는데

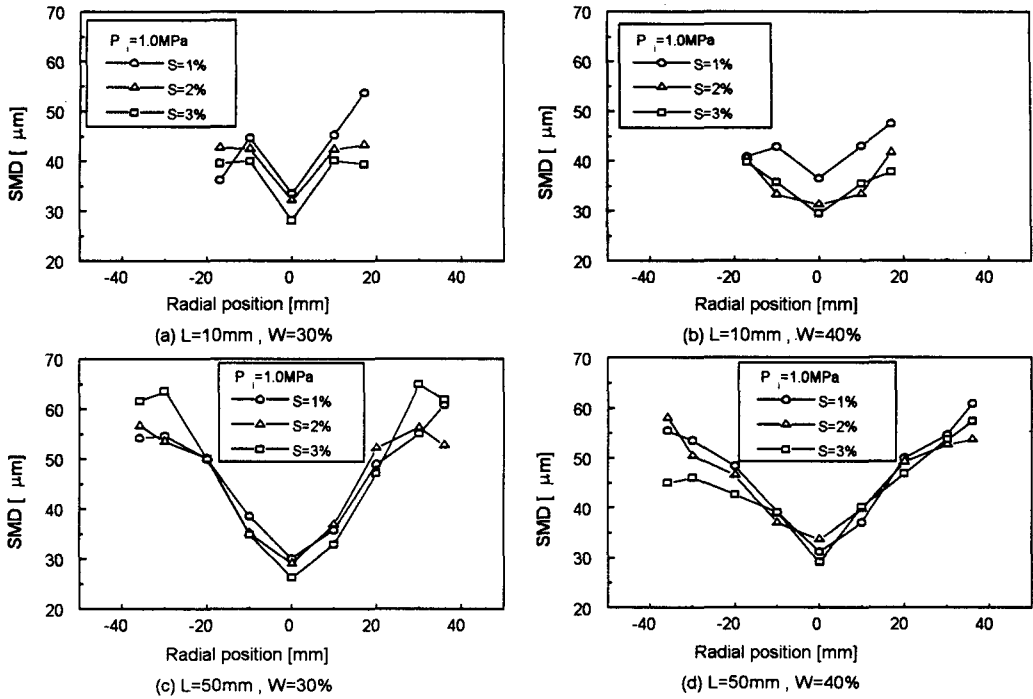


Fig. 3 Influence of surfactant content on SMD

유화연료의 물함량이 일정할 때 계면활성제의 양이 증가할수록 점도가 작아지므로(그림 2참조) SMD가 작아진다.

Figure 4는 분사압력, 물함량, 계면활성제함량의 변화에 따른 분무 중심과 외곽에서 SMD를 비교한 것이다. 분무의 중심과 외곽의 SMD는 각 축방향위치별 네점에서 측정하여 평균값

으로 하였다. 유화연료의 모든 경우에서 외곽의 액적의 크기가 크다는 것을 알 수 있다. SMD값은 분무의 외곽에서 축방향거리의 증가에 따라 증가하고 분무의 중심에서는 작아지는 경향을 나타내었다. 축방향거리 증가에 따른 분무중심에서 SMD는 작아지다가 최저값을 가진 후 다시 증가하는 경향을 나타내었다. 그러

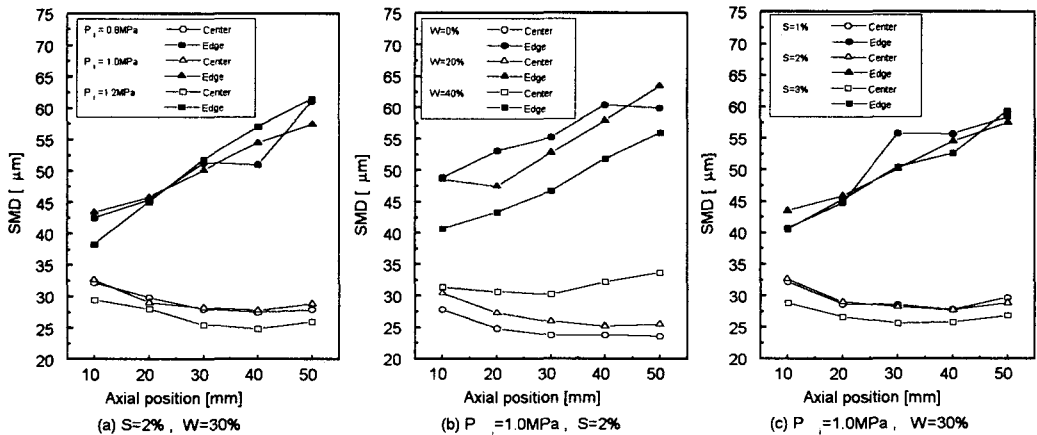


Fig. 4 Variation of SMD on center and edge of spray

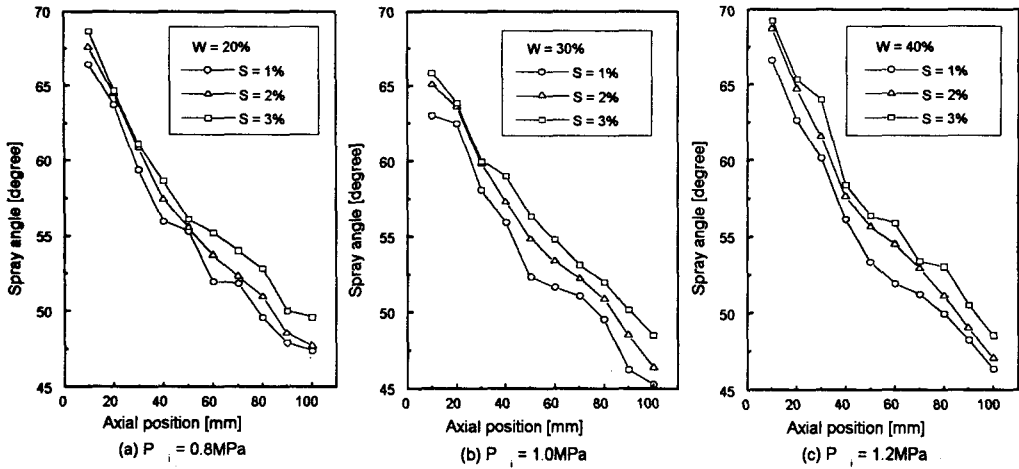


Fig. 5 Influence of surfactant content on spray angle

나 이것은 측정오차에 의해 무시될 수 있다. Figure 4(b)에서 물함량이 많은 유화연료의 경우, 즉 점도가 큰 유화연료의 경우 분무중심에서는 액적이 크게 나타나고 분무외곽에서는 액적이 작게 나타나는 것을 알 수 있다.

Figure 5는 여러 가지 계면활성제함량, 물함량, 분사압력에서 축방향위치에 따른 분무각의 변화를 나타낸 것이다. 분무각은 축방향거리가 증가함에 따라 감소하였다. 또 계면활성제함량의 증가에 따라 분무각이 넓어짐을 알 수 있다. 이것은 유화연료의 점도가 계면활성제의

양이 증가할수록 작아지며 점도가 작을 경우 분무각이 증가하기 때문이다. 또 분무각은 물함량이 증가함에 따라 감소하고 분사압력의 증가에 따라 다소 증가하였다.

계면활성제함량 2%인 유화연료가 분무의 축방향거리에서 중심에 대해 대칭을 이루는 것을 볼 수 있으므로 다음에 계면활성제함량 2%에 대해 설명하기로 한다.

축방향거리 50mm에서 여러 가지 분사압력과 물함량에 대한 SMD의 변화를 Fig. 6에 나타내었다. 분사압력의 증가는 액체가 빠른 속도로

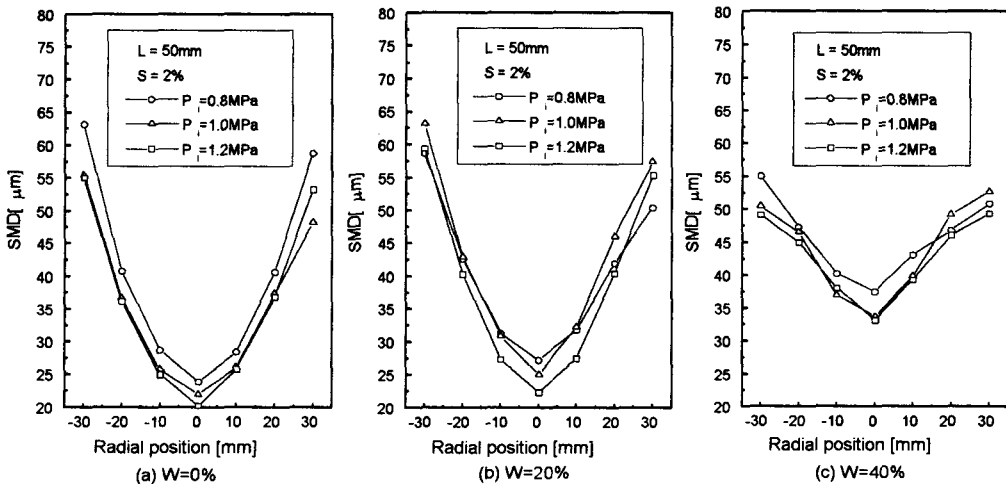


Fig. 6 Variation of SMD profiles for different injection pressures

분사되어 미립화가 잘 이루어지게 한다. 그림 6에서도 분사압력의 증가에 따라 액적크기가 작아짐을 알 수 있다. 그림에서 반경방향 위치에서 SMD의 분포가 중심에 대해 대칭을 이루고 있는 것을 볼 수 있다. 그리고 분무의 중심에서 작고 외곽에서 큰 액적이 나타났다. 또한 액적크기는 일정한 반경방향 위치와 물함량에서 분사압력의 증가에 따라 감소하였다. 그러나 0.8~1.2MPa의 압력에서 액적크기의 차이는 작고 압력의 영향은 예상보다 그다지 크지 않았다.

Figure 7에 계면활성제함량 2%일 때 1MPa의 분사압력에서 측방향위치에 따른 SMD의 변화를 나타내었다. 액적은 분무의 외곽으로 갈수록 커지는 경향을 나타내었다. 이것은 액적의 합침(coalescence)에 기인하는 것으로 생각된다. 점도가 큰 유화연료는 분무중심에서 액적이 크게 나타나고 점도가 작은 유화연료는 분무의 외곽에서 액적이 크게 나타났다.

분무각에 미치는 노즐끝에서부터 측방향거리의 영향을 Fig. 8에 나타내었다. 노즐로부터 측방향거리가 증가할수록 분무각이 10mm일 때

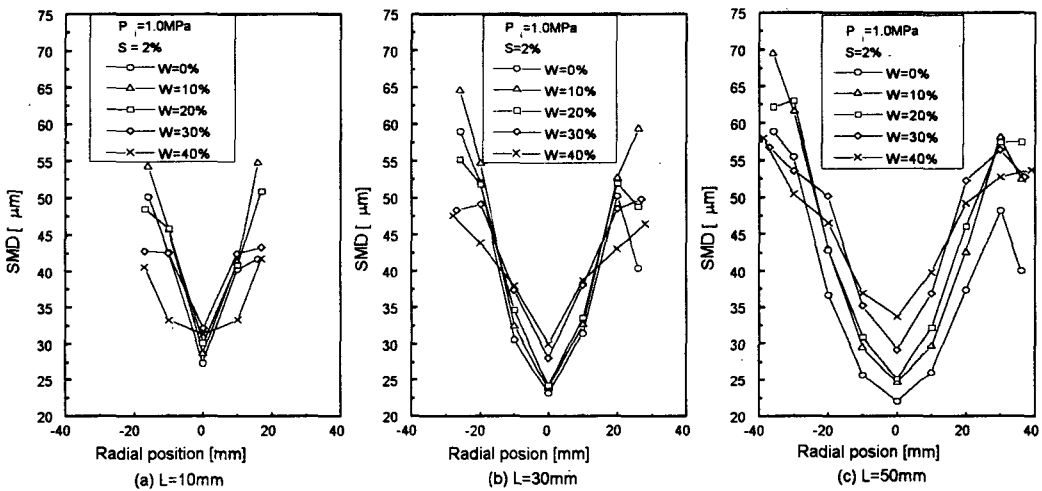


Fig. 7 Variation of SMD profiles for different water contents

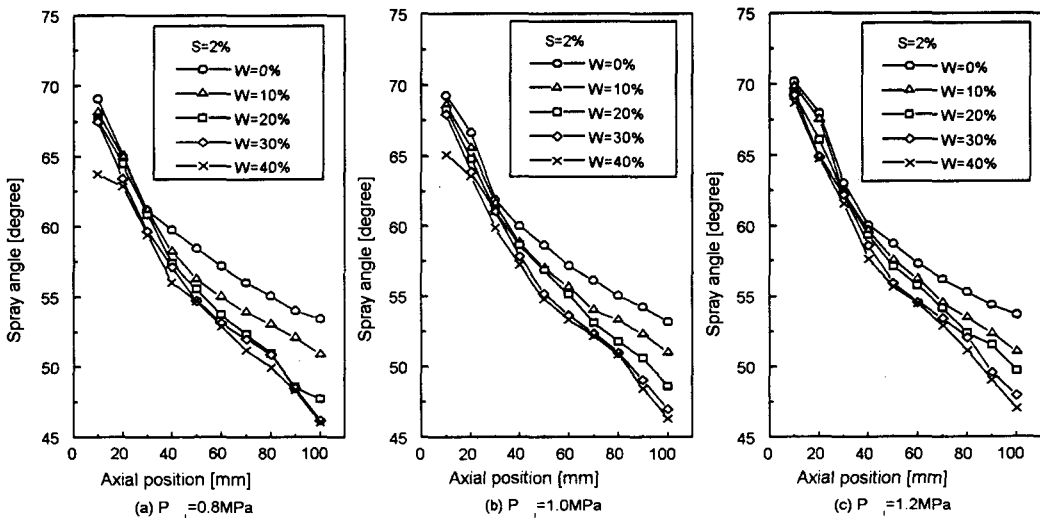


Fig. 8 Variation of spray angle for different water contents

약 70° 에서 100mm일 때 약 46° 로 감소한다. 물함량에 따른 분무각의 차이는 축방향거리 20mm부근까지는 분무가 발달되지 않아서 크게 차이가 나지 않았다. 그러나 분무가 발달된 먼 축방향거리에서는 물함량에 따라 크게 차이가 남을 알 수 있다. 또한 물함량의 증가에 따라 분무각이 감소함을 알수 있는데 이것은 물함량이 증가하면 점도가 커지기 때문이다. 이들 그림으로부터 압력이 증가하면 분무각이 다소 커지는 것을 알 수 있다. 이는 분사압력이 높아지면 미립화의 질을 향상시키기 때문이다.

유화연료에서 물과 기름 액적 각각의 크기분포는 유화연료의 연소현상분석에 매우 도움이 되지만 이 실험에서는 유화연료에서 물과 기름의 액적크기분포를 구별하지는 못했다.

#### 4. 결론

오일버너용 압력선회 노즐로부터 분사된 유화연료의 분무특성을 실험하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 경유에 물과 계면활성제의 첨가는 연료의 성질을 변화시켜 액적의 크기와 분무각에 영향을 미친다.
2. 계면활성제의 함량이 증가하면 분무액적의 지름 SMD는 감소하고 분무각은 증가한다.
3. 점도가 큰 유화연료의 경우 분무의 중심에서 큰 액적이 나타나고 점도가 낮은 유화연료는 분무의 외곽부근에서 큰 액적이 나타난다.
4. 노즐로부터 축방향거리가 증가할수록 분무각은 감소한다.
5. 분무각은 계면활성제의 함량이 증가함에 따라 증가한다. 이것은 계면활성제함량이 증가함에 따라 점도가 작아지기 때문이다.
6. 분무각은 물함량이 증가함에 따라 감소한다.

이것은 물함량이 증가할수록 점도가 높아지기 때문이다.

#### 후 기

본 연구과제는 농림부 농림특정연구과제에 연구되었으며 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

#### 참고문헌

1. C.K.Law, C.H.Lee, and N.Srinivasan, *Combust. Flame* 37 : 125-143, 1980.
2. S.H.Chung and J.S.Kim, *23rd Symp.(Int'l) on Combustion*, The Combustion Institute, pp. 1431-1435, 1990
3. M.T.Jaoques, J.B.Jordan, A.Williams, and L.Hadley-Coates, *16th Symp.(Int'l) on Combustion*, The Combustion Institute. pp. 307-319, 1976.
4. M.Tsue, T.Kadota, D.Segawa, and H.Yamasaki, *26th Symp.(Int'l) on Combustion*. The Combustion Institute, pp.1629-1635, 1996.
5. C.H.Hwang and C.K.Law, *Combust. Flame* 59: 53-62, 1985.
6. M.Mattiello, L.Cosmai, L.Pistone, F.Beretta, and P.Massoli, *24th Symp.(Int'l) on Combustion*, The Combustion Institute. pp.1573-1578, 1992.
7. G.Greeves, I.M.Khan, and G.Onion, *16th Symp. (Int'l) on Combustion*, The Combustion Institute, pp. 321-336, 1976.
8. S.R.Gollahalli, M.L.Rasmussen, and S.J.Moussavi, *18th Symp. (Int'l) on Combustion*, The Combustion Institute, pp. 349-360, 1981.
9. D.U.Hur and N.S.Lee, *Proc. of Paver-Gen '96*, New Delhi. India. 17-19 Sept., pp. 2-210~225, 1996.
10. H.Jahani, and S.R.Gollahalli, *Combust. Flame* 37 : 145-154. 1980.

11. F.D.A.Souza, L.S.Messias, M.M.Santos, and R.Kunert. *2nd European Conf. on Industrial Furnaces and Boilers*, Algarve, Portugal, 1-5 April, 1990.
12. N.Nagai, T.Kumazawa, Y.Hayakawa, and H.Okazaki, *Second International Conference on Liquid Atomization and Spray Systems*, Madison, USA, pp. 215-219, 1982.
13. P.Zhou and I.Thorp, *IMEchE Seminar on Diesel Fuel Injection System*, Birmingham, 14-15 April, pp.35-44, 1992.
14. P.L.Zhou and I.Thorp, *16th Annual Energy-Sources Technology Conference and Exhibition*, Jan. 31-Feb. 4, Houston, Texas, 1993.
15. A.H.Lefebvre, *Atomization and Sprays*. Hemisphere Pub. Co., New York, 1989.
16. L.Bayvel and Z.Orzechowski, *Liquid Atomization*, Taylor & Francis, 1993.
17. P.G.Felton, A.A.Hamidi, and A.K.Aigal, *3rd International Conference on Liquid Atomization and Spray Systems*, London, July, pp. IVA/4/1- 11, 1985.