

점도변화에 따른 탄화수소계 연료의 분무특성에 관한 연구

A study on the spray characteristics of hydrocarbon-fuels with viscosity variations

이용일*, 한계섭**

Lee, Yong-Il*, Han, Jae-seob**

ABSTRACT

An experimental study was carried out to understand the spray characteristics of three kinds(kerosene, heating oil & diesel) of hydrocarbon-fuels. Fuel temperature and injection pressure were main variables in the experiment. Fuel Temperature was changed to obtain various levels of fuel viscosity.

Spray angle and spray length were measured by using LVS(Laser Vapor Screen) photographs. 1D PDPA system was used to measure droplet size & droplet velocity.

In room temperature, spray characteristics of three kinds of fuels were good, especially in case the fuel injection pressure was more than 6 Kg/cm²

It was also found that spray characteristics were poor in case fuel kinematic viscosity was more than 5cSt.

주요기술용어

spray characteristic(분무특성), spray angle(분무각), SMD(평균입경), Spray velocity(분무속도)

Nomenclature

- * CP : Cloud Point
- CFPP : Cold Filter Plugging Point
- PP : Pour Point
- T_{fuel} : 연료탱크에서의 연료온도
- T_{pump} : 연료펌프 전단에서의 연료온도
- T_{nozzle} : 연료분사노즐에서의 연료온도
- P_{inj} : 연료온도변화에 따른 연료 분무압력
- D₃₂ : 연료의 평균입경크기
- V_{droplet} : 액적의 속도

* : SK(주) 대덕기술원 석유제품기술팀

** : 충남대학교 기계공학과

1. 서론

가스터빈이나 로켓 및 보일러 등은 왕복엔진
에서와 같이 간헐적인 연료공급에 의한 연소가
아니라 안정한 미립화 및 잘 혼합된 연속적인
연료공급에 의한 연소를 요구한다. 액체연료의
안정한 미립화 및 혼합은 연소기의 성능을 좌우
하는 요소 중 하나인 연소안정성에 중요한 영향
을 미친다. 즉, 연소기에 공급된 연료의 분무성
능이 떨어지게 되면 점화불안, 불완전연소, 진동
연소 및 연소소음, 소화 등의 많은 연소상의 장
애를 유발하게 되는 원인이 되는 것이다. 따라
서, 노즐의 형태, 주위기체의 조건(온도, 압력,

용축과 증발현상), 분사압력 및 분사액체의 물성치(점도, 표면장력, 밀도) 등 연료의 미립화 및 혼합 등의 분무성능에 미치는 요소들은 다각적으로 많은 연구자들에 의해서 연소성능을 개선하기 위한 연구논제의 대상이 되어왔다.^{(1), (2)}

본 연구에서는 일상적으로 많은 용도로 사용되고 있으나 체계적인 자료는 비교적 적은 실내등유, 보일러등유, 경유 등의 3개 유종에 대해서 연료의 점도변화(연료온도변화) 및 분무압력을 바꾸어 가며 연소실에 대한 정확한 성능예측과 밀접한 관계가 있는 인젝터의 분무성능(분무각, 분무입경, 분무속도)을 평가하고자 하였다.

2. 실험

2.1 실험장치

본 연구를 위한 실험장치의 구성은 Fig.1과 같이 연료공급부, 분사각 측정장치, 분무입경 및 속도를 측정하는 1D PDPA (Phase Doppler Particle Analyzer)등으로 구성하였다.

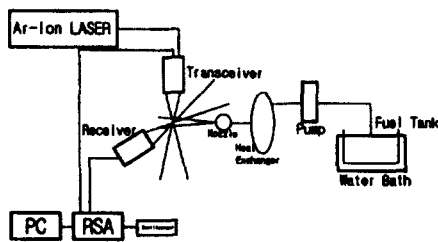


Fig.1 Schematic of Experimental System

연료는 Water Bath(Maker : Fisher Scientific, Model : 9510)에서 온도가 조절되어 펌프에서 가압된 뒤 노즐에서 분무된다. 이때 연료가 펌프를 거치면서 온도가 상승하므로 연료펌프와 노즐 중간에 열교환기를 설치하였다. 열교환기는 길이 3m, 직경 4.8mm의 동관에 연료가 흐르고 그 주위에 냉매가 흐르도록 설계되었다. 노

즐에서 분사되는 연료는 Spray Chamber로 분사되며, Spray Chamber는 분무가시화, 분무입경 및 분무속도 측정을 위해 두께 3mm의 아크릴판으로 제작되었다. Spray Chamber의 고정 및 이송을 위해 특수 제작된 Traverse(제조사 : 세원기연)가 사용되었다. 분사압력이 감소할 때 분무성능을 확인하기 위해 실험에서 분사압력은 수동으로 1~10kg/cm² 까지 조절하였다. 분무노즐은 K사 18,000 kcal/hr의 압력분무식 보일러(모델 : KDB-176SA)에 부착된 것으로 분무각이 80°인 Hollow Cone Type 이다. LVS(Laser Vapor Screen)를 활용한 분무의 단면사진을 통해 분무각을 측정하였으며 실험변수에 따른 분무의 거시적인 특징을 확인하였다. 분무입경 및 속도를 측정하기 위해 1D PDPA(Maker : Aerometrics)가 사용되었다. Light Source로는 5W Ar/Ion Laser(Model : Aero 70-5)가 사용되었으며 Transceiver와 Receiver는 S/N 비가 가장 좋은 30°로 설치하여 실험하였다. 신호처리를 위해서는 RSA(Real Time Signal Analyzer, Model : SFT 5000)가 사용되었다.

2.2 실험방법

본 연구에 사용된 연료들의 성상은 Table 1에 나타내었으며, 실험은 크게 상온 및 저온 분무 실험으로 구분할 수 있으며 Table 2에 자세하게 나타내었다.

Table 1 Characteristics of Test fuels

item \ Fuel	Kerosene	Heating Oil	Diesel
Specific Gravity (15/4 °C)	0.7982	0.8300	0.8388
Flash point(°C)	43	45	48
Sulfur(ppm)	15	645	412
CP(°C)	-	-4	-5
CFPP(°C)	-	-15	-16
PP(°C)	-	-25	-25
water and sediment (wt %)	LT 0.005	LT 0.005	LT 0.005

Table 2 Experimental variables and measuring items

		Spray Experiment	
Experimental variables	Injection Pressure	1~10 kg/cm ²	
	Fuel Temperature	상온~-3.3℃	
	Kinds	<ul style="list-style-type: none"> · Kerosene · Heating oil · Diesel 	
Measuring items	<ul style="list-style-type: none"> · Laser Sheet Visualization · Spray Angle, droplet Size(μm) · droplet Velocity(m/s) 		

분무실험에 사용된 변수는 분사압력 및 연료 온도이며 각각 1~10 kg/cm², 상온~-3.3℃까지 조절하였다.

분무실험에서는 LVS를 활용한 단면가시화, 분무각 측정 및 1D PDPA(Phase Doppler Particle Analyzer)를 사용한 분무입경(μm)과 분무속도(m/s)를 측정하였다. 이 분무입경은 연소성능과 직접 관련이 있으며 분무입경이 증가하면 점화 불량 및 불완전연소의 원인이 된다. 또한, 연료의 온도를 정확하게 측정하기 위해서 연료탱크, 펌프 전단 및 펌프 후단(즉, 노즐에서의 연료온도)에 K-Type 열전대를 설치하여 연료의 온도를 측정하였다. 연료의 분사압력은 펌프에서 조절하였으며 노즐 전단에 압력계를 설치하여 압력을 측정하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 분무조건별 분무특성의 거시적 관찰

노즐에서 분사되는 연료의 분무특성을 거시적으로 관찰하기 위해서 분사압력 및 연료온도를 바꾸어 가며 실험을 실시하였다. Fig. 1, 2, 3은 상온에서 유종별로 분사압력에 따른 분무특성변화를 보여주는 사진이다.



(a) Injection Pressure 6 kg/cm²



(b) Injection Pressure 8 kg/cm²



(c) Injection Pressure 10kg/cm²

Fig. 1 Laser Sheet Photographs at Specific Spray Condition with various fuel injection pressure (for Kerosene)



(a) Injection Pressure 6 kg/cm²



(b) Injection Pressure 8 kg/cm²



(c) Injection Pressure 10 kg/cm²

Fig. 2 Laser Sheet Photographs at Specific Spray Condition with various fuel injection pressure (for Heating Oil)



(a) Injection Pressure 6 kg/cm²



(b) Injection Pressure 8 kg/cm²



(c) Injection Pressure 10kg/cm²

Fig. 3 Laser Sheet Photographs at Specific Spray Condition with various fuel injection pressure (for Diesel)

실내동유의 분무각은 공급압력이 6kg/cm²에서 10kg/cm²까지의 분무각을 보여주는 사진으로서 압력이 변화하더라도 크게 바뀌지 않으나 보일러동유와 경유는 저압에서 분무각의 감소가 커짐을 알 수 있다. 또한, 동일한 압력(8kg/cm²)에서 유종별 분무단면은 경유의 경우 분무각의 감소가 가장 크게 나타남을 보여주고 있다.

Fig. 4는 사용된 연료들에 대한 온도가 변할 때 동점도의 영향을 보여주는 그림이다.

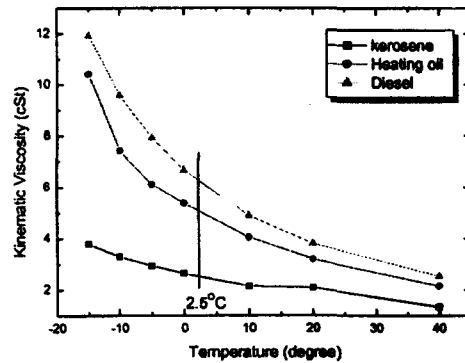


Fig. 4 Kinematic viscosity variation of test fuel with temperature

Fig. 5~7은 연료의 온도가 감소할 경우(점도가 증가하는 효과)의 분무특성 변화를 보여주

는 사진으로 실내등유의 경우 상온에서 -3.3°C 까지 바뀌어도 분무 패턴에 변화가 없음을 알 수 있다.

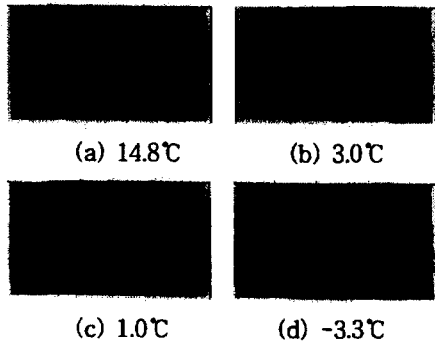


Fig. 5 Laser Sheet Photographs with fuel temperature variations(Kerosene)

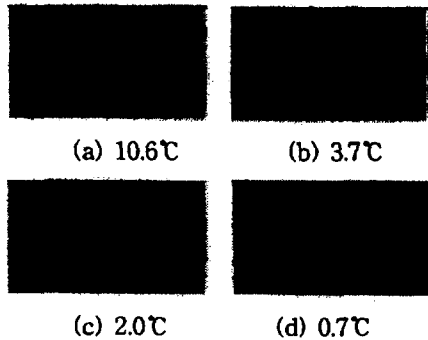


Fig. 6 Laser Sheet Photographs with fuel temperature variations(Heating oil)

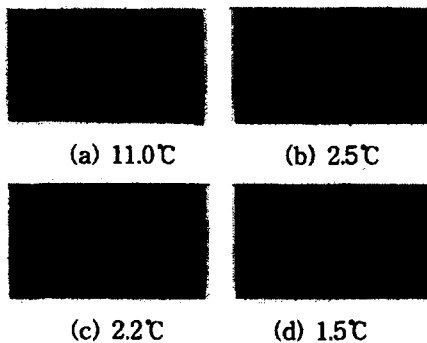


Fig. 7 Laser Sheet Photographs with fuel temperature variations(Diesel)

그러나, 보일러 등유의 경우는 연료의 온도가 감소함에 따라 분무각이 감소하다가, 2.5°C 근처에서는 분무각이 감소 및 증가를 반복하는 등의 분무 패턴에 변화를 보인다. 특히 연료온도가 2.5°C 근처에서는 분무 패턴의 변화가 급격하게 되어 분무가 한쪽 방향으로 되기도 하고 분무가 되지 않고 큰 액적의 형태로 배출되기도 한다. 경유의 경우도 보일러 등유의 경우와 유사한 분무 패턴을 보이며 연료온도가 2.5°C 근처에서는 분무 패턴의 변화가 급격하게 되며 2.5°C 이하에서 변화가 더욱 심하게 된다. 이러한 분무 패턴의 급격한 변화는 점화시의 점화불량과 불완전 연소의 원인이 될 수 있다.

3.2 분무입경 및 속도 변화

3.2.1 상온(22°C) 분무특성

상온에서의 분무실험 결과, 유종간 분무특성(분무각, 분무입경)의 차이는 미미하였다.

분무각은 유동의 Laser 단면을 사진촬영한 후 그 각을 측정하였으며 분무의 길이는 동일한 위치에서 LVS 사진상의 길이로 유종별 분무길이의 상대적인 비교를 위해 측정하였다. 본 연구에서는 Fig. 8과 같이 노즐 입구에서 중력의 영향으로 반경 방향으로 유동 패턴이 급변하는 위치(1차 구분점)까지의 길이를 L1, 노즐에서 분무 끝까지의 길이를 L2로 정의하였다. 분사압력의 경우는 연료온도가 바뀌어도 실험범위 내에서는 크게 변화하지 않았다. 다만 유동에 장애가 발생하거나 분무 패턴에 변화가 심할 경우, 압력변동의 폭이 매우 크게 나타났다. 실험 결과 실내등유는 연료온도가 -2.7°C 까지 냉각되어도 분무입경이 상온의 경우와 같이 무화가 잘 되었다. 그러나 보일러등유와 경유는 연료온도변화에 따른 입경변화가 매우 컸으며 약 2.5°C 이하에서 분무에 장애가 발생하기 시작했다. 이때 연료의 점도는 $5.1\sim 6.3$ cSt로 보일러에서의 원활한 분무를 위해 일정 점도 이하의 연료가 공급되어야 함을 알 수 있다.^{(3),(5),(6)}

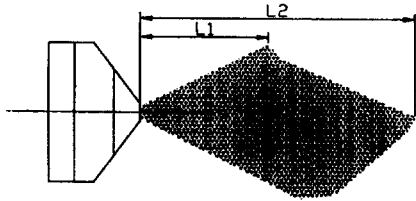


Fig. 8 Schematics diagram of spray length of L1 and L2

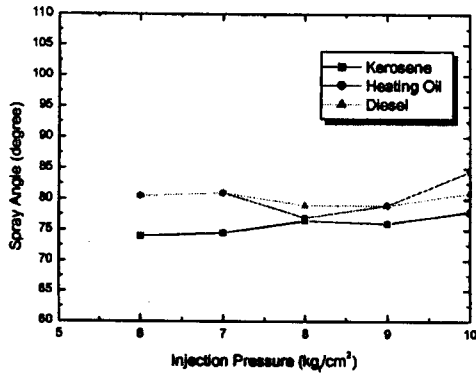


Fig. 9 Spray Angle with fuel Injection Pressure variations

Fig. 9는 연료분사압력에 따른 유종별 분사각의 변화를 보여주는 것으로서 유종별로 그 차이가 각각 실험오차 범위에서 유사함을 알 수 있다. 또한 상온에서는 실내동유의 경우보다 보일러동유와 경유가 노즐의 분무각 설계치인 80°에 더 근접함을 알 수 있다.

Fig. 10에 나타난 바와 같이 유동 패턴이 변하는 분무길이(L1)은, 경유의 경우 제일 크고 압력변화에 따른 변화가 제일 크게 나타났다. 반면 실내동유의 경우는 L1이 가장 작고 변화폭이 제일 작았는데 이는 비중과 동점성도의 영향이 분무특성에 반영된 결과로 판단된다.

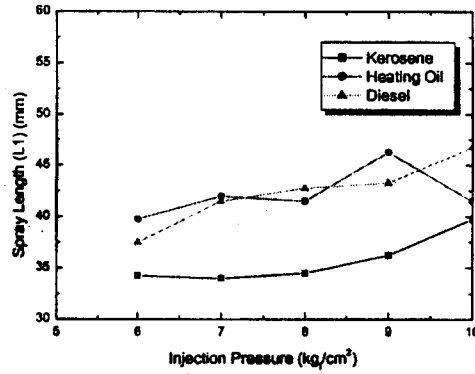


Fig. 10 Spray Length (L1) with fuel Injection Pressure variations

Fig. 11은 노즐에서 분무끝까지의 분무길이(L2)의 변화를 나타낸 것으로, 실험에 사용된 보일러동유의 경우 압력변화에 대한 변동폭이 제일 크게 나타났다.

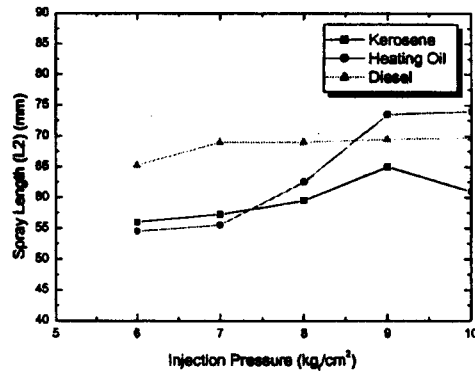
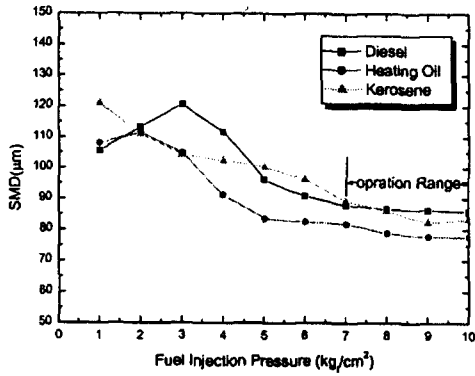


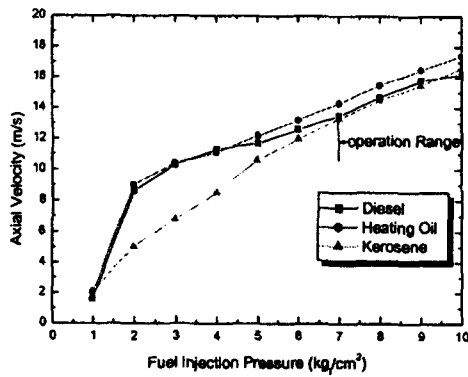
Fig. 11 Spray Length (L2) with fuel Injection Pressure variations

Fig. 12에는 1D PDPA에 의한 유종별 분무입경과 분무속도에 대한 실험결과를 나타내었다.

측정위치는 보일러의 점화기가 설치된 위치로, 노즐 중심에서 측방향과 반경방향으로 각각 3mm, 5mm인 위치이다.



(a) Mean droplet size

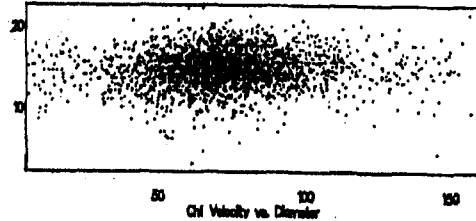


(b) Axial spray velocity

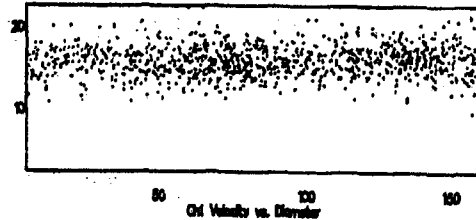
Fig. 12 SMD and Axial velocity with fuel Injection Pressure variations (Temp. 22°C)

측정결과 보일러등유와 경유는 분무압력이 6~10kg/cm²로 변할때 분무입경의 차이가 미미하였으나, 실내등유의 경우는 그 차이가 상대적으로 크게 나타났다. 또한 분사압력이 비정상적일 경우 분무특성을 관찰하기 위해서, 분사압력이 5 kg/cm² 이하에서의 분무실험 결과를 나타내었다. 각각의 데이터는 분무실험중 5,000~10,000개의 데이터를 평균한 값으로 분무입경의 경우 SMD(Sauter Mean Diameter)를 사용하였다. 이 데이터를 살펴보면 분무입경이 작을수록 분무속도가 커지는 것으로 나타나 분무유체의

질량이 보존된다는 것을 알 수 있다.⁽⁷⁾



(a)good spray



(b)bad spray

Fig. 13 Example of data distribution

또한 Fig. 13에서 보여주는 분무측정시의 데이터 분포에서 알 수 있듯이 분무특성이 양호한 경우(a)에는 데이터의 분포가 밀집되어 Gaussian 분포의 양상을 보이지만 분무특성이 좋지 않을 때(b)에는 데이터가 매우 넓게 분포되어 있음을 알 수 있었다. 실험결과 대부분의 조건에서 보일러등유의 연소특성이 제일 양호한 것으로 나타났다으며 이는 기존연구의 결과를 잘 반영하고 있다.

3.2.2 연료온도변화에 따른 분무특성 변화

Table 3에 나타낸 바와 같이 연료의 온도를 바꾸어 가며 분무에 장애가 생기는 온도를 측정하였다. 거시적인 관찰 결과는 LVS 분무가시화 실험에서 발견하였으며 그 때의 분무특성을 구체적으로 알기 위하여 분무입경과 분무 속도 측정하였다. 3개 유종 모두 펌프를 거치면서 연

Table 3 Spray Characteristics with Fuel Temperature(Nozzle) variations

Fuel		Values									
Kerosene	$T_{fuel}(^{\circ}C)$	0.5	-4.5	-5.1	-9.5	-14.5	-14.8	-14.8	-19.2	-19.4	-19.7
	$T_{pump}(^{\circ}C)$	10.0	50	3.0	0.0	-3.0	-4.0	-4.0	-8.0	-9.0	-11.0
	$T_{nozzle}(^{\circ}C)$	11.4	7.0	5.0	3.0	1.5	0.3	0.0	-1.0	-1.9	-2.7
	$P_{ini}(kg/cm^2)$	8.0	8.0	7.9	7.9	7.9	7.9	7.9	7.9	7.9	7.8
	$D_{32}(\mu m)$	76.8	75.1	76.6	84.6	76.0	82.6	82.9	77.0	78.2	79.5
	$V_{droplet}(m/s)$	11.1	13.3	13.2	13.0	12.9	12.9	12.9	12.8	12.7	12.7
Heating Oil	$T_{fuel}(^{\circ}C)$	4	-3.7	-7.8	-9.0	-9.0	-16.0	-16.0	-17.7	-17.7	-17.7
	$T_{pump}(^{\circ}C)$	12	1.0	0	0	-1.0	-3.0	-4.0	-4.0	-4.0	-5.0
	$T_{nozzle}(^{\circ}C)$	12	8.0	6.0	5.0	4.0	2.5	2.0	2.0	1.8	1.7
	$P_{ini}(kg/cm^2)$	8.0	8.0	8.0	7.9	7.9	7.8	7.75	7.75	7.7	7.8
	$D_{32}(\mu m)$	106.6	118.0	123.4	116.2	114.0	117.0	113.5	109.4	123.6	132.8
	$V_{droplet}(m/s)$	13.9	14.1	14.3	14.1	13.8	13.0	10.9	12.13	7.7	2.15
Diesel	$T_{fuel}(^{\circ}C)$	4	0	-7.0	-9.0	-14.6	-15.2	-15.2	-15.2	-16.9	-17.0
	$T_{pump}(^{\circ}C)$	11	7	1	-2	-6.0	-8.0	-8.0	-8.0	-9.0	-8.0
	$T_{nozzle}(^{\circ}C)$	12	10	6.7	3.9	3.3	2.9	2.5	2.3	2.3	2.3
	$P_{ini}(kg/cm^2)$	8	8	8	8	7.8	7.8	7.7	7.6	7.6	7.6~8.3
	$D_{32}(\mu m)$	99.3	103.8	119.4	120.3	124.9	125.7	126.6	124.4	115.0	122.7
	$V_{droplet}(m/s)$	13.3	13.5	13.5	13.35	12.35	12.17	12.0	11.1	11.34	10.62

료온도가 급격하게 상승하였으며 이러한 이유로 펌프 후단에 열교환기를 설치하여 연료온도를 제어하였다. 따라서 본 실험은 정상적으로 가동하는 보일러보다는 장기간 보일러를 가동하지 않아 노즐 전단의 연료온도가 냉각되어 있는 보일러에 더 타당하다고 판단된다.

분사압력의 경우는 연료온도가 바뀌어도 실험 범위 내에서는 크게 변화하지 않았다. 다만 유동에 장애가 발생하거나 분무 패턴에 변화가 심할 경우, 압력변동의 폭이 매우 크게 나타났다. 실험결과 실내등유는 연료온도가 $-2.7^{\circ}C$ 까지 냉각되어도 분무입경이 상온의 경우와 같이 무화가 잘 되었다. 그러나 보일러등유와 경유는 연료온도변화에 따른 입경변화가 매우 컸으며 약 $2.5^{\circ}C$ 이하에서 분무에 장애가 발생하기 시작했다. 이때 연료의 점도는 $5.1\sim 6.3$ cSt로 원활한 분무를 위해 일정 점도 이하의 연료가 공급되어야 함을 알 수 있다.⁽⁸⁾

4. 결론

연료의 점도가 분무특성에 미치는 영향을 확인하기 위하여 연료온도를 바꾸어가며 분무실험을 실시하였으며 다음의 결론을 얻었다.

1. 상온에서 유종의 변화에 따른 분무압력 변화폭은 작았으며, 분무압력이 6 kg/cm^2 이상에서 무화성능의 차이는 작았다. 이는 Fig. 4에서 나타난바와 같이 상온에서의 연료점도가 4cSt이하로 작기 때문에 나타나는 결과이다.
2. 실내등유의 경우 저온에서도 분무특성 및 점화특성이 양호하였으며 이는 저온에서도 점도가 4cSt이하로 낮게 유지되기 때문이다.
3. 보일러등유와 경유의 경우 노즐 전단에서의 연료온도가 $2.5^{\circ}C$ (점도 5cSt 이상) 이하에서 분무특성의 변화가 심한 것으로 나타났다.

5. 참고문헌

1. CWM의 연소효율 증대를 위한 버너 및 분무기술 개발연구(IV), 전력연구원, 1991
2. 분사연소시스템의 화염 및 연소특성에 관한 연구, 한국과학재단, 1989
3. 신설 난방유의 보일러 적용시험 사업보고서, 한국에너지기술연구소, 1998
4. 1 Component Fiber Optic Hardware Manual, Aerometrics, 1993
5. 대한석유협회, "석유제품의 규격과 품질", 1999
6. (주) 유공, "석유제품분석(1)", 유공사업내 직업훈련원
7. Owen, Coley, "Automotive Fuels Handbook", Society of Automotive Engineers, 1990
8. 김기성, "2유체 분사장치의 분무 및 연소특성에 관한 연구", 한국과학기술원 박사학위논문, 1994