

온풍난방기용 건타입 중유버너의 분사특성과 연소특성

Spraying and Combustion Characteristics of Heavy Oil in the Gun type Burner for Hot Air Heater

김영중*	연태용**	윤진하*	고길표*	장진택*	유영선*	강금춘*
정회원		정회원	정회원	정회원	정회원	정회원
Y.J.Kim	T.Y.Yeon	J.H.Yun	K.P.Koh	J.T.Chang	Y.S.Yoo	K.C.Kang

1. 서론

중유는 잔사유, 보일러유, 벙커유 또는 C 중유라고도 하며 사용목적에 따라 적당히 조절하므로 그 특성도 다양하고 규격도 각국마다 상이하다 (이진열, 1998). 우리나라에서 중유는 동점도, 인화점, 유동점 등의 여러 기준에 의해 A, B, C 중유로 분류되는데 일반적으로 50℃에서의 동점도와 중유에 포함되는 유황의 무게비율(%)로 구분된다. A중유는 동점도가 20cSt 이하로 유황함유량은 2.0% 이하, B 중유는 50이하, 3.0%, C 중유는 540이하, 4.0%로 규정되어진다. 보통 정유회사에서는 중유 C를 비등점 350℃에서 증류한 다음 A 유는 C 유분 70%, 경유유분 30%를 섞어 만들고 B 유는 A, C 유를 대강 반반씩 섞어서 제조한다. 중유연소는 중유의 높은 점도 때문에 예열의 필요성이 있으며 대규모 용량시설에서는 건타입 버너 보다는 로타리식 버너로 연소한다. C중유는 대도시 및 근교지역에서는 대기환경오염방지법에 의해 원칙적으로 연소가 금지되어 있고 일반 주유소에서는 구입이 곤란하며 일부 해안지방 및 제주도에서 온풍난방기 및 온수보일러시스템 연료로 사용되고 있다.

건타입버너에서 중유사용은 경유와는 달리 중유의 높은 점도 때문에 가열장치를 부착하여 중유의 유동성을 증가시켜 분사 해야 한다. 현재 우리나라 대부분의 건타입 중유버너는 외국에서 완제품을 수입하거나 주요부품이 수입되어 조립되고 있다. 국내 중유버너생산업체에 의하면 수입중유버너는 생산국의 중유성질에 맞게 설계 제작되어 우리나라의 중유성질과는 과히 맞지 않아 여러 가지 문제를 야기하고 또 중유질이 낮아 불완전연소로 인하여 그을음(soot)이 많이 발생하며 이에 따라 연소효율이 해가 갈수록 저하하며(60~70%) 고장이 자주 발생한다고 한다. 현재 중유는 점도 때문에 B중유의 경우 100~130℃로 가열하여 분사시키는데 가열온도 및 분사압력에 대한 분사입자의 크기라든가 분사입자와 연소성능에 관한 관계자료가 찾아보기 힘든 실정이다.

본 연구의 목적은 건타입 중유버너에서 중유의 점도특성에 따른 분사입자의 특성과 이에 따른 연소특성을 규명하여 중유연소에 대한 이해를 높이고 효율적인 중유사용지침 마련과 중유버너설계에 관한 기초자료를 수집하고자 한다.

* 농업기계화연구소

** 신흥콘트롤

2. 재료 및 방법

가. 실험설계

중유의 분사특성과 연소특성을 조사하기 위해 현재 사용중인 중유분사조건을 고려하여 분사압력 3수준, 온도 3수준으로 정했다(Table 1). 각 측정값은 3 반복의 평균값을 취하였다.

Table 1. Experimental variables and their levels

Variables	Levels	No. of level
Pressures, MPa (kg/cm ²)	1.57, 1.96, 2.35 (16, 20, 24)	3
Temperatures, °C	70, 100, 130	3

나. 점도측정

점도측정은 중유 A, B, C에 관하여 측정하였다. B 유는 A, C유를 50%씩 배합하여 제조하였다. 중유는 국내 A 정유회사의 제품으로 주요성분과 물리적 성질은 Table 2와 같다.

Table 2. Characteristics of heavy oil A and C

item	heavy oil A	heavy oil C
pour point, °C	-12	12
Gravity, API at 60°C	28.0	16.4
Density, kg/L at 15°C	0.8867	0.9502
Viscosity, kin, cst at 50°C	8.791	402.1
components, %		
C	83.01	85.34
H	18.59	12.49
N	0.07	0.11
O ₂	0.35	0.2~1
S	0.5	0.5

중유의 점도측정은 1ℓ의 중유를 용기에 넣고서 항온조에서 가열시켜 정해진 온도에 도달하면 회전식점도계(Model B Viscometer, Tokyo Keiki Co.)로 절대점도(absolute viscosity)를 측정하고 동시에 메스실린더와 저울을 사용하여 밀도도 측정하였다. 각 온도에서의 동점도(kinetic viscosity)는 절대점도를 밀도로 나눈 값을 취했다. 항온조에는 비등점이 140°C인 실리콘유를 사용하여 100°C 이상 범위에서도 중유의 점도측정이 가능하도록 하였다.

다. 분사입자의 입경 측정

분사입자의 입경 측정은 말븐입자측정기(Malvern particle sizer 2600)를 사용하였다. 말븐 입자측정기는 광산란기술을 분무입자 측정에 적용한 것으로 편리성, 정확성 및 반복성은 이미 여러 문헌에서 입증되었다(Lefebvre, 1989). 본 시험에서 규정하는 입자크기는 말븐입자분석기에서 계산되는 값으로 입자크기에 따른 분사량을 누적시켰을 때 전체 분사량의 50% 되는 지점에서의 입자크기다. 렌즈의 초점거리는 300mm로 정했으며 입자크기측정범위는 5.8~564 μm 이다. 측정위치는 노즐선단으로부터 레이저선 까지의 거리는 200mm 떨어진 곳으로 정하였다. Figure 1은 중유버너 및 말븐입자측정장치를 보여준다.

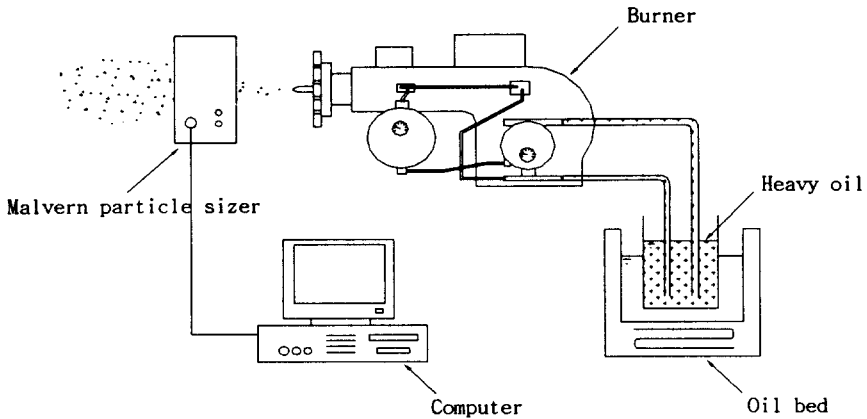


Figure 1. Experimental set-up for droplet size measurement

중유버너에는 3kW 짜리 히터가 부착되어 있고 hago 노즐(3.75gals/hr, 60°, hollow cone type)에서 가열된 중유를 분사시킨다. 분사펌프(Suntec, E4NA10015P, FRANCE)는 기어펌프로써 토출압력 최고 24kgf/cm² 짜리를 사용하였으며 분사압력조정은 압력게이지를 펌프에 부착하여 압력조정나사를 조정하여 실시하였고 송풍기의 풍량은 전 시험조건에서 13.8m³/min로 고정하였다. 이때 유조에는 비등점이 140℃인 실리콘유를 채워 100℃이상의 분사조건도 만족시켰다.

라. 연소특성 측정

연소특성측정은 분사입자측정에서 사용한 버너를 중유온풍기(Model SHAH-200H, 연소로 $\Phi 776 \times L2140$, 2 Pass, 열교환기 $\Phi 76.3 \times L2120$)에 부착하여 실시하였다. 시험변수와 수준은 실험설계에 따라 수행하였으며 연소가스분석기로는 Kane-May MODEL KM-9104를 사용하여 배기가스의 성분을 측정하고 비교함으로써 최적연소조건을 결정하였다. 과잉공기비의 측정방법으로는 4가지가 있으며(김광열 등, 1995) 본 시험에서 사용한 연소가스분석기의 과잉공기비 측정방법은 완전연소시의 CO₂ 치, 즉 완전연소시 최대 CO₂양과 분석기에서 측정되는 CO₂양의 비로 나타난다.

3. 결과 및 고찰

가. 중유의 동점도

Figure 2은 반로그그래프로 중유 A, B, C, 및 경유의 동점도를 온도에 따라 나타냈다. 온도범위는 상온 27°C에서부터 140°C로 동점도는 최고 7455cSt(C 유, 27°C), 최저 4.26cSt(A 유, 140°C)로 나타났다.

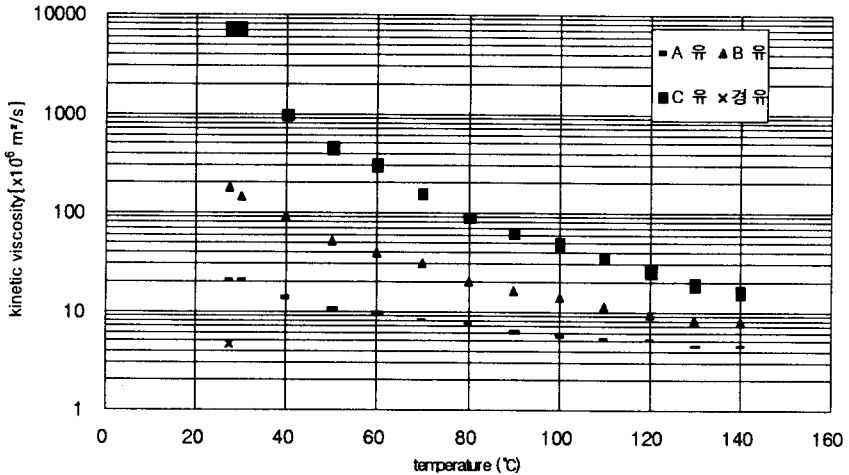


Figure 2. Kinetic viscosity of heavy oil A, B, and C

온도변화에 따른 동점도 변화특성은 기대했던 대로 역비례 관계였고 중유의 종류에 따라서 큰 차이를 보였다. 100°C를 넘어서 140°C 까지 A, B 유는 6cSt 이하의 변화가 관측되었고 C중유는 30cSt 이상의 변화를 보였다. 온도 70, 100, 130°C에서 A중유의 동점도는 7.9, 5.7, 4.3 cSt 이고 B중유는 30.4, 13.7, 7.9cSt 로 측정되었으며 온도가 증가함에 따라 점도는 감소하였다.

나. 분사특성

(1) 입자크기

Figure 3는 중유 A와 B의 온도와 압력에 따른 중유입자 크기를 나타냈다. A 중유 입자의 최대크기는 130°C(4.3cSt) 1.57MPa에서 98 μ m로 나타났고 최소입자크기는 70°C(7.9cSt), 2.35MPa에서 72 μ m로 나타났으며 B 중유의 입자크기는 최고 67 μ m가 온도 70°C, 점도 30.4cSt, 압력 1.57MPa에서 발생하였고 최소입자는 52 μ m로 온도 130°C, 점도 7.9cSt, 압력 2.35MPa에서 발생하였다. A, B 중유는 공통적으로 입자크기는 압력이 클수록 입자크기는 줄어들었으며 입자크기에 미치는 점도의 영향은 A 중유에서는 뚜렷하게 나타나지 않았고 B 중유에서는 점도가 줄어들어 그에 따라 입자크기가 감소되었으나 높은 압력에서는 크게 차이가 나지 않았다.

일반적으로 점도가 증가함에 따라 입자크기는 크게 나타나는 경향이 있다고 알려졌으나

사실은 유량계수(flow number, m^2), 노즐의 종류, 유체의 표면장력(surface tension) 등에 따라 상반되는 결과가 보고되었다. Wang 과 Lefebvre(1987)에 의하면 디젤유에 폴리부테인(polybutene)을 섞어 여러 점도의 유체를 만든 후 DELAVAN 노즐 90° 로 시험한 결과 같은 압력(0.3 ~ 2.0MPa)에서 입자의 크기는 점도가 높을수록 커지는 경향을 보였지만 같은 점도에서 유량계수(flow number, m^2)가 작은 경우에는 유량계수가 큰 유체보다는 평균입자가 작다는 것을 발견하였다.

본 시험에서 사용한 Swirl 타입 노즐은 일정압력에서 점도가 작은 유체는 점도가 큰 유체보다 분사량(질량기준)이 적은 특징을 가지고 있으며 일정한 압력과 온도에서 경유의 분사량이 물의 분사량 보다 적은 이유도 분사실내의 와류속도로 인하여 유체통과면적이 감소하기 때문이다(Donker, 1998). 다른 이유로는 레이저 측정지점에서 입자의 중첩현상이 생길 수 있고 유체가 노즐에서 분사될 때 분열길이(breakup length)가 점도 및 분사압력에 따라 다르므로 측정지점의 위치에 따라 평균입자가 다를 수도 있다. Chiger(1991)는 유체의 점도와 표면인장력(surface tension)이 평균입자(SMD)에 미치는 영향은 문헌에 따라 서로 상충되는 결과가 많아서 명확히 정의할 수 없다고 하였다. 본시험에 사용한 hago노즐은 콘타입 분사각도 60° 인 노즐이며 분사각의 각도가 작을수록 점도가 평균입자에 미치는 영향이 작다고 알려졌다(T.F. Su, 1997).

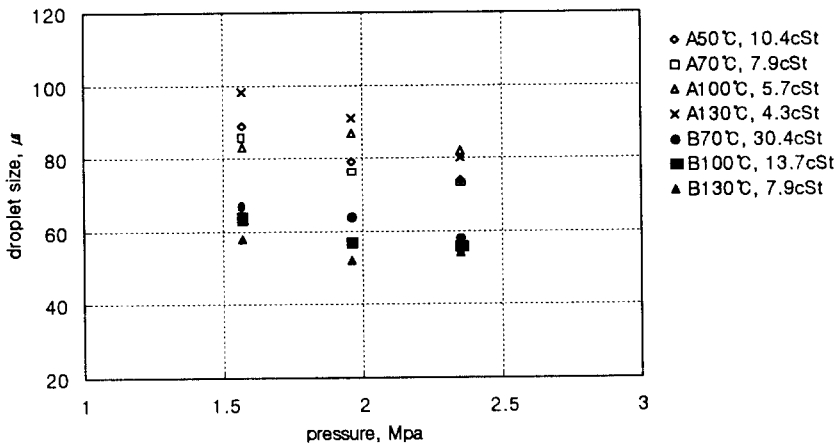


Figure 3. Droplet size changes of heavy oil A and B by temperature and pressure in the heavy oil burner with hago nozzle of 3.75gal/hr, 60° .

(2) 입자분포

Figure 4는 A, B 중유의 최적분사조건에서 입자의 분포상태를 보여준다. A중유의 평균입자는 $72.86\mu m$ 이었고 B중유는 $50.87\mu m$ 으로 나타났다. A중유의 입자분포특성은 $71.5\mu m$ 를 기준으로 보면 전체의 48.7%가 $71.5\mu m$ 보다 작은 입자였던 반면에 B중유는 79.5%가 $71.5\mu m$ 보다 작게 나왔다. 이와 같은 입자분포의 특성 때문에 전체적으로 B중유의 입자분포가 A중유보다 작게 나왔다. 이 분사조건하에서 연소특성은 Table 4와 5에서 보면 A, B 중유의 CO_2 ,

CO, 배기가스온도는 각각 13.1%, 13ppm, 250℃ 및 14.1%, 10ppm, 261℃가 되었다. 이러한 연소특성은 입자분포와 밀접한 관계가 있는 것으로 여겨진다.

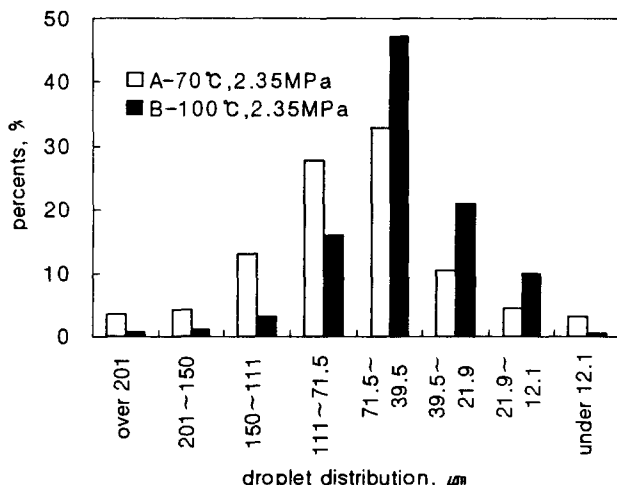


Figure 4. Droplet distribution of heavy oil A and B by the different atomization conditions

다. 연소특성

(1) 연소성능

중유 A, B의 연소특성은 연료의 분사압력과 온도를 변화시키면서 배기가스의 성분을 조사한 것으로 Table 3과 4에 요약되었다..

Table 3. Combustion characteristics of heavy oil A in the different temperature and pressure.

temp (°C)	viscosity (cSt)	pressure (MPa)	excess air ratio	CO ₂ (%)	CO (ppm)	O ₂ (%)	flue gas temp, %	efficiency, %	droplet size, μm
50	10.4	1.57	1.46	10.8	26	6.6	196	91.8	89
		1.96	1.26	12.4	24	4.5	216	92.1	79
		2.35	1.14	13.8	23	2.7	224	92.5	74
70	7.9	1.57	1.61	9.8	14	7.9	240	88.4	86
		1.96	1.35	11.7	13	5.4	245	90.1	76
		2.35	1.2	13.1	13	3.5	250	91	73
100	5.7	1.57	1.72	9.2	24	8.7	212	89.4	89
		1.96	1.42	11.1	31	6.2	238	89.9	87
		2.35	1.3	12.1	17	4.8	237	90.9	82
130	4.3	1.57	1.7	9.3	20	8.6	223	88.9	98
		1.96	1.48	10.6	19	6.8	234	90.3	91
		2.35	1.34	11.7	19	5.4	212	91.7	80

전체적인 경향을 살펴보면 분무입자가 작을수록 연소성능이 우수함을 알 수 있었다. 중유 A의 온도 50℃에서 CO₂의 발생량이 10.8~13.8%로 우수했지만 CO의 농도가 온도 70℃에서의 연소보다 약 10ppm 더 배출되었으며 이에 따른 불완전연소로 배기가스의 온도도 210℃ 근처로 유은 70℃에서의 250℃ 보다 30~40℃ 낮게 연소되었음을 알 수 있었다. 따라서, 중유 A의 CO₂와 CO 발생량 및 배기가스온도 등을 고려하면 적정연소조건은 유은을 70℃로 유지시키면서 2.35MPa 압력으로 분사, 연소하는 것이 가장 바람직스럽다는 것을 알 수 있었다. 이 때 분무입자의 크기는 73 μ m, 동점도는 7.9cSt, CO₂와 CO 발생량 및 배기가스온도는 각각 13.1%, 13ppm 및 250℃, 과잉공기비는 1.2로 나타났다. 한편 B 중유의 적정연소조건(Table 4)은 유은 100℃, 2.35MPa로 이 때 분무입자의 크기는 52 μ m, 동점도는 13.7cSt로 조사되었고 CO₂와 CO 발생량 및 배기가스온도는 각각 14.1%, 10ppm 및 261℃, 과잉공기비는 1.11로 나타났다. 불완전 연소를 나타내는 척도 중의 하나는 배기가스 중의 CO의 농도로 판단할 수 있다. A, B 중유의 배기가스중 CO가 차지하는 비중은 전체적으로 보면 A 중유(13~31ppm)가 B 중유(4~21ppm)보다 높다는 것을 알 수 있다. 이것은 여러 각도에서 볼 수 있겠지만 가장 합리적인 이유는 분사입자 크기가 A 중유(73~91 μ m)보다는 B 중유(52~67 μ m)가 작다는 데서 기인한다고 볼 수 있을 것이다. 그 이유로는 분사입자가 크면 공중에 체류하는 시간이 짧고 따라서 연소실 벽이나 바닥에 부착하여 불완전연소를 야기하여 CO 발생이 많아지는 직접적인 원인이 되었을 것이다.

Table 4. Combustion characteristics of heavy oil B in the different temperature and pressure.

temp (°C)	viscosity (cSt)	pressure (MPa)	excess air ratio	CO ₂ (%)	CO (ppm)	O ₂ (%)	flue gas temp, °C	efficiency, %	droplet size, μ m
70	30.4	1.57	1.53	10.3	21	7.2	211	90.6	67
		1.96	1.17	13.4	19	3.1	237	91.8	64
		2.35	NOT AVAILABLE						58
100	13.7	1.57	1.37	11.5	11	5.7	240	89.8	62
		1.96	1.28	12.3	10	4.6	255	90.2	57
		2.35	1.11	14.1	10	2.2	261	91.2	52
130	7.9	1.57	1.55	10.2	10	7.4	239	88.9	63
		1.96	1.35	11.7	7	5.4	251	89.8	56
		2.35	1.24	12.7	4	4.1	212	91.7	54

(2) 각 변수사이의 상관관계

Table 5는 시험변수와 측정된 값 사이에서의 상관계수를 나타내었다. 입자크기는 공히 압력에 역비례 관계가 있었으며 즉 압력이 커질수록 입자가 작아졌던($r = 0.74(p=0.005)$, $0.85(p=0.007)$) 반면 동점도의 영향은 명확하게 나타나지 않았다 ($r = -0.508, 0.612$). 이는

앞에서 기술한대로 어떤 점도범위에서는 점도보다는 노즐의 형상이라든지 다른 요인이 입자 크기결정에 더 큰 작용을 하는 것으로 추정된다. 입자크기가 CO₂ 발생량에 미치는 영향은 각각 -0.875(p=0.0002) 및 -0.642(p=0.085)로서 입자가 작을수록 연소가 성공적이었다는 것을 알 수 있었고 CO의 발생량은 B중유에서는 분사입자크기와 밀접한 관계를 보였지만 (r=0.795) A 중유에서는 r=0.338 로서 시험조건 범위에서 입자크기의 영향은 뚜렷하지 못했다. 이는 어떤 다른 인자가 CO 생성과 관련이 있는 것이라 여겨진다. 연소효율은 CO₂생성량에 따른다고 볼 수 있지만 CO 양과의 관계는 미미한 것으로 나타났다.

Table 5. Pearson correlation coefficients between the variables in the combustion of heavy oil A and B (upper values in the cell is A oil and lower is B oil combustion).

	tempera ture	viscosity	pressure	excess air ratio	CO ₂	CO	O ₂	flue gas tm	efficienc y	droplet size
temper ature	1.0									
viscosi ty	-0.979 -0.99	1.0								
pressur e	0.0 0.23	0.0 -0.249	1.0							
excess air ratio	0.459 0.124	0.478 -0.073	-0.857 -0.839	1.0						
CO ₂	-0.485 -0.139	0.502 0.089	0.853 0.843	-0.99 -0.995	1.0					
CO	-0.037 -0.91	0.106 0.941	-0.229 -0.492	0.108 0.211	-0.114 -0.183	1.0				
O ₂	0.478 0.152	-0.494 -0.103	-0.858 -0.841	0.992 0.995	-0.999 -0.999	0.124 0.168	1.0			
flue gas tm	0.054 0.145	-0.187 -0.232	0.344 0.196	-0.231 -0.402	0.231 0.406	-0.573 -0.255	-0.241 -0.404	1.0		
efficien cy	-0.418 -0.42	0.522 0.434	0.62 0.689	-0.806 -0.735	0.796 0.740	0.232 0.171	-0.792 -0.746	-0.373 -0.275	1.0	
droplet size	0.554 -0.556	-0.508 0.612	-0.742 -0.852	0.862 0.65	-0.875 -0.642	0.338 0.795	0.876 0.634	-0.333 -0.456	-0.589 -0.246	1.0

(3) 과잉공기비와 CO₂양과의 관계

Figure 5는 A, B 중유의 과잉공기비대 배기가스중의 CO₂ 농도를 보여준다. 과잉공기비와 CO₂는 거의 직선적인 관계를 보여주며 회귀방정식 $Y = -7.89X + 22.46$ ($R^2=0.98$)으로 표시될 수 있었다. 과잉공기비 1.15 ~ 1.2 범위에서 CO₂ 농도는 13 ~ 14%로 과잉공기비를 이 수준에 맞추는 것이 중유버너의 연소효율 증가에 도움을 줄 수 있을 것이다.

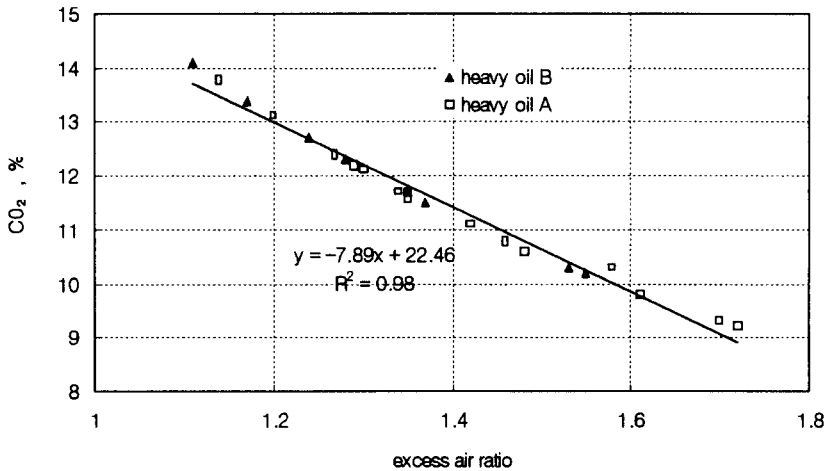


Figure 5. Relationship between CO₂ concentration and excess air ratio in the combustion of heavy oil A and B.

4. 결론

건타입 중유버너에서 우리나라 중유의 점도특성에 따른 분사입자의 특성과 이에 따른 연소특성을 규명하기 위하여 A, B, C중유를 대상으로 온도에 따른 동점도, 분사압력에 따른 분사입자크기 및 온도와 분사압력에 따른 연소특성을 규명하였다. 사용노즐은 hollow cone swirl 타입 노즐로 분사각 60° 공칭분사용량 3.75gals/hr였다. 주요 연구결과는 다음과 같다.

1. 중유의 동점도를 조사한 결과 온도 70, 100, 130℃에서 A중유의 동점도는 7.9, 5.7, 4.3 cSt 이고 B중유는 30.4, 13.7, 7.9cSt 로 측정되었으며 온도가 증가함에 따라 점도는 예상했던 대로 감소되었다. 최고점도는 C중유 27℃에서 7,455cSt, 최저점도는 A중유 140℃에서 4.26cSt로 관측되었다. 100~140℃에서 동점도의 변화폭은 A,B유는 6cSt 이하인 반면 C유에서는 30cSt 이상을 보이고 있었다.
2. A중유 입자의 최대크기는 130℃(4.3cSt) 1.57MPa에서 98μm로 나타났고 최소입자크기는 70℃(7.9cSt), 2.35MPa에서 72μm로 나타났으며 B 중유의 최고입자크기는 70℃(30.4cSt) 압력 1.57MPa에서 67μm로 최소입자는 130℃(7.9cSt), 압력 2.35MPa에서 52μm로 나타났다. 분사압력이 커질수록 입자크기는 줄어들었지만 점도에 따른 입자크기의 변화는 뚜렷하지 못했다. 이는 보다 더 심층적 연구가 필요한 과제라 여겨진다.
3. A중유의 적정연소조건은 70℃, 2.35MPa 으로 분무입자의 크기는 73μm, 동점도는 7.9cSt, CO₂ 와 CO 발생량 및 배기가스온도는 각각 13.1%, 13ppm 및 250℃, 과잉공기비는 1.2로 나타났다. B 중유의 적정연소조건은 100℃, 2.35MPa 로 이 때 분무입자의 크기는 52 μm, 동점도는 13.7cSt로 조사되었고 CO₂ 와 CO 발생량 및 배기가스온도는 각각 14.1%, 10ppm 및 261℃, 과잉공기비는 1.11로 나타났다.

5. 참고문헌

1. 권영삼. 1998. 시설원에 에너지 절감 대응방안. 시설원에 에너지절감대책심포지움, 충북대학교 첨단원예기술개발연구센터, 1998.9.4
2. 김광열, 노수영. 1995. 연소공학. p. 78~80. 동화기연.
3. 이진열, 1998. 유류공학. 효성출판사.
4. Chigier, N. 1991. Future research in atomization and sprays. Atomization and sprays 2000. p. 1~25. Workshops Proc. marriot hotel, Gaithersburg, MD. July 19, 1991,
5. Donker, Marcel. 1988. Personal correspondence. Fluid instruments BV, Eindhoven, Netherands.
6. Lefebvre, A.H. 1989. Atomization and Sprays. p391~403. Hemisphere Publishing Corporation.
7. Su, T.F., Su, J.M. Kozma, C.B. Warrick , and P.V. Farrell. 1997. Effects of fuel viscosity and ambient temperature on spray characteristics from multi-hole nozzle injectors. proceedings of ICLASS-'97, AUGUST 18-22. 1997, SEOUL.
8. Wang, X.F. and Lefebvre, A.H. 1987. Mean drop sizes from pressure-swirl nozzles, AIAA J. Propul. Power, 3(1):11-18.