

예열된 디젤연료의 분무특성에 미치는 영향에 관한 연구

허종철*, 이규영**

A Study on the Effect of Spray Characteristics of Preheated Diesel Fuel

Huh Jong-Chul, Lee Gyou-Young***

Summary

The correlations between the spray tip penetration and the spray angle were investigated by the direct photographic method under the various conditions of injection pressure, ambient gas pressure and preheated fuel.

With the increase of ambient gas pressure, the spray tip penetration was decreased and the spray angle was increased. The transition point in the spray tip penetration was observed at the higher ambient gas pressures and strongly depended upon the fuel temperature. The spray angles in the case of preheated fuel were larger than those of non-preheated fuel conditions. Particularly, the spray angle at ambient gas pressure of 1.5 and 3MPa was sharply increased due to the result of change of fuel properties, but the spray tip penetration was decreased. The initial stage of fuel spray showed the form of non-disintegrated intact core, but the formation of ligament increasingly was developed with the increase of the fuel temperature.

서 론

직접분사식 디젤기관에 있어서 고압의 연료는 오리피스를 통과하는 동안 압축에너지가 운동에너지로 변환되면서 연소실에 분사되어 미세한 액적을 생성시켜 공기와의 접촉 표면적을 증가시킨다. 또 이렇게 분사된 연료분무는 연소가 시작되기 전 약 1-1.5ms의 시간 동안 적당한 관통도와 미립화된 입

자를 가져야만 공기와의 양호한 혼합기둥 이루게 된다. 그러나 분무는 분사직후 미분열 액주의 상태이며, 또한 시간 경과에 따라 액주가 분열하여 미립화되는 복잡한 분열과정을 거치면서 완전히 발달한다. 이 과정에서 분무는 노즐 선단으로 부터 약 10-15mm 미분열 액주가 존재하며, 이는 불완전연소를 유발시켜 유해물질인 배출미립자, 탄화수소와 질소산화물 등의 오염물질을 배출시키는 주 원인(Chigier, 1981)이 되고 있다.

* 공과대학 기계공학과(Dept. of Mechanical Engineering, Cheju Univ., Cheju-do, 690-756, Korea)

** 인하공업전문대학 기계과(Dept. of Mechanical Engineering, Inha Technical Junior College, Incheon, Korea)

액체 분류의 분산에 영향을 주는 변수들은 분사 액체의 유동조건과 물성치, 주위 기체의 조건 그리고 노즐의 형상으로 요약될 수 있다. 이에 관련된 무차원수는 레이놀드수, 웨버수, 제트수등이 있으며 분무의 분열길이와 분류의 분산영역등이 이들 무차원수의 함수로 표현되고 있다. 그러므로 연료의 예열은 연료의 점성계수와 표면장력을 변화함으로써 분사제 및 노즐형상비를 바꾸지 않고 분무의 분산에 영향을 주는 무차원수를 변화시킬 수 있다.

연료를 예열하여 미립화를 촉진 또는 미분열 액주길이를 감소시키는데 관련된 종래 연구를 소개하면 Hiroyasu(1988)는 물성이 다른 연료를 일정한 분사압력으로 분사할 경우 평균액적직경, 액적분포등을 측정 해석한 결과, 연료의 점성과 표면장력이 보다 큰 값을 갖는 경우는 분류의 분열과정을 억제하며, 분사압력 및 분위기압력이 상승 및 노즐내 난류등은 분열과정을 촉진시킨다고 하였다.

Lienhard(1966, 1970) 등은 과열 액체분류(Superheated liquid jet)의 분무 형태를 관찰하여 후래쉬 비등이 발생 유무를 무차원수로 구분하였으며 또한 과열분류의 분열길이(Breakup length)의 변동에 대하여 연구하였다. Sinnamon(1984)은 연료의 온도를 비등점까지 예열하여 분사시켰을 때의 분무 특성을 실험과 이론해석을, Murayama등(1987)은 실제 디젤기관에서 여러 종류의 저질연료를 예열, 분사시켰을 때 분무특성의 변화와 전반적인 기관성능과 배출 미립자에 관한 후래쉬 비등(Flashboiling)의 효과에 대하여 조사하였다.

Solomon등(1982)은 고온 고압하에서 연료에 공기를 용해시킨 후 분사하여 분무특성을 조사한 결과 분무각은 증가하고 분무입경은 감소함을 밝혔고, 또한 고온고압의 연료가 액체의 포화증기압보다 낮은 분위기내로 분사시켜 순간적인 비등에 의한 분열 및 분산효과 증대에 관한 연구가 Nagai(1985), Kitamura(1986), Miyadake등(1981)에 의하여 이루어졌다.

본 연구는 분무특성을 변화 시키는 매개변수중 작동유체인 연료를 예열시켜 고압용기내에 분사하였을 때 연료의 물성(밀도, 점도, 표면장력)의 변화가 분무발달 및 분무특성에 미치는 영향을 파악

하고자 한다. 이는 실용기관의 기관조건, 연소실내 분위기조건, 분사제조건을 바꾸지 않고 분무상태를 개선할 수 있으며, 따라서 양호한 연소를 실현시켜 기관성능향상 및 공해물질 저감을 위한 기초자료가 될 것으로 생각한다.

실험장치 및 방법

본 실험에서 사용한 노즐은 단공(Single hole)이며, 직경(D)과 오리피스길이(L)는 표 1과 같다.

Table 1. Specification of nozzle

Nozzle diameter	Aspect ratio(L/D)
0.65mm	2

본 연구의 실험에 사용된 실험장치는 허등(1993) 연구와 동일하나, 연료유의 예열은 제 1축압실과 제 2축압실 사이의 고압라인을 통과하는 동안 제 1가열장치를 설치하였고 이 장치에서 소정의 온도까지 1차 가열된다. 장치의 상세도는 Fig.1과 같다.

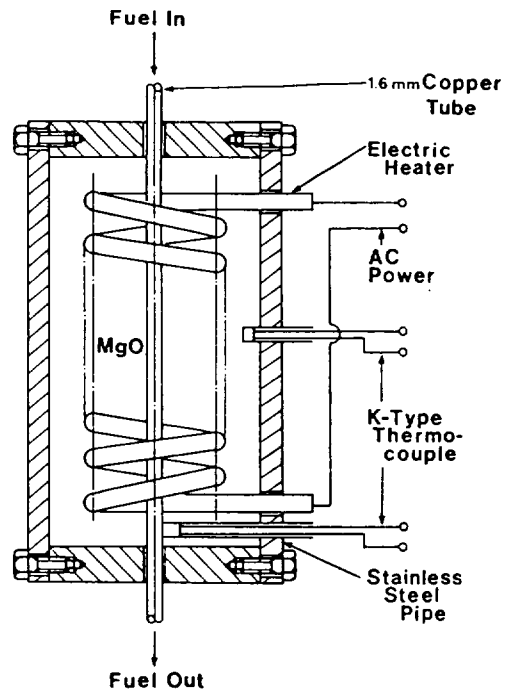


Fig. 1. Primary electric heater.

가열장치내의 히터는 환상의 니크롬선으로 연료관 주위에 설치하였으며 히터와 관사이에 열용량이 크고 전열특성이 좋은 MgO₂을 채워 소정의 온도를 일정한 시간동안 유지하도록 하였다. 제 1가열장치에서 어느 정도 예열된 연료는 다시 제 2축압실에 설치된 제 2가열장치에서 재 가열되어 원하는 노즐 출구 온도가 되도록 하였다. Fig. 2는 제 2가열장치의 상세도이다. 제1, 제2 가열장치에서의 연료온도 제어는 K-Type 열전대를 온도 제어회로에 연결하여 설정된 온도를 정확히 제어하였다. 설정온도는 상온, 50, 100, 150°C이며, 사진촬영방법 및 조건은 허등(1993)의 연구와 동일하다.

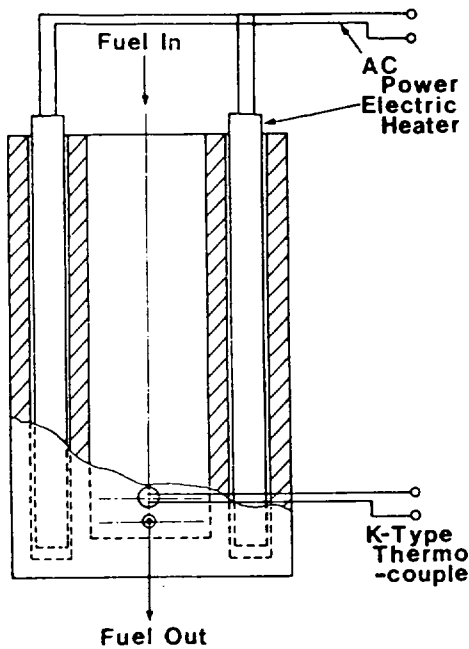


Fig. 2. Secondary electric heater and accumulator.

실험결과 및 고찰

1. 연료유의 예열에 의한 물성변화

Fig. 3는 연료를 예열했을 경우 실험범위에서의 분사압력에서 유량계수를 보여 주고 있다. 그림에서 분사압력에 따라 유량계수의 값이 불안정하게 나타나고 있다. 이는 고압하에서 포화 증기압까지 가열된 연료가 노즐로 방출할 때 노즐내 유동의 공

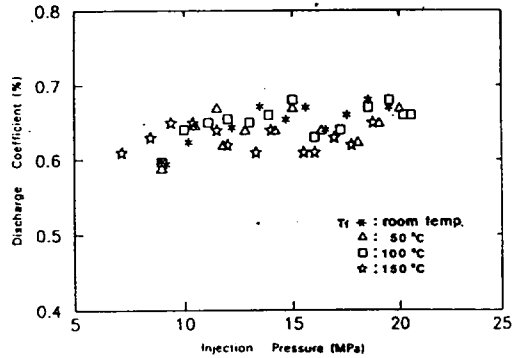


Fig. 3. Variation of discharge coefficient with injection pressure for various fuel temperatures (Pa=0.1MPa)

동현상에 의하여 불안정한 것으로 사료된다.

그러나 유량계수의 값이 0.61-0.66범위에서 변동하고 있으므로 본 연구에서는 온도에 의한 유량계수는 일정한 것으로 산술평균하여 0.645로 하였다. 그러므로 유량계수로 부터 본 연구에 사용된 저유황 경유의 온도와 압력에 따른 체적유량을 역으로 구할수 있으며 그 값 및 온도와 압력이 변할경우 연료물성의 변화물 표 2에 나타내었다.

Table 2. Volumetric flowrates & properties on temperatures & pressures of low sulfur diesel fuel oil.

Descriptions	Heated temp. Pres. (MPa)	Room temp.	50	100	150
		(°C)			
Volumetric flowrates (m ³ /sec)×10 ⁻⁵	7	2.702	2.727	2.727	2.840
	14	3.825	3.870	3.937	4.008
	21	4.679	4.731	4.810	4.892
Kinematic viscosity (m ² /sec)×10 ⁻⁴	7	4.833	2.604	1.283	0.763
	14	5.442	2.893	1.407	0.828
	21	6.079	3.192	1.534	0.897
Surface tension (Kg/sec ²)×10 ⁻⁴		3.077	2.776	2.355	1.947
Vapour pressure (Pa)		98.069	588.415	4609.248	20594.512
Specific gravity		0.8468			

이 표로 부터 연료는 온도상승에 따른 유량이 증가율은 작으나(5% 미만), 물성(점성계수, 표면장력)이 급격히 감소하고 있으며 동시에 연료의 증기압은 온도상승에 의해 급격하게 증가하고 있으므로

연료가 노즐내 유동시 케비테이션이 발생하거나 발생할 가능성이 크므로 미립화특성이 양호할 것으로 생각된다.

2. 연료온도가 상승할 경우 시간경과에 따른 분무특성

Fig. 4(a, b)는 분사압력이 7Ma이고 연료온도가 각각 50℃ 및 150℃, 분위기압력이 대기압인 경우, 분사직후 부터 1.9ms까지 시간경과에 따른 분무사진이다. 이것은 고속의 액체분류가 분열 성장하여 완전히 발달될 때 까지의 미립화과정을 보여주고 있다.

Fig. 4(a)의 150℃인 경우 분사직후인 0.05ms에서는 미분열상태의 액주표면이나, 50℃의 경우보다 표면파가 더욱 발달 교란되어 있으며 이미 액주로 부터 액사가 나타나고 있다. 0.1, 0.2, 0.3, 0.4ms로 분무가 성장함에 따라 50℃의 경우보다 150℃는 액주 표면파와 액사형성이 가늘고 액적발생이 빠르고 왕성하다. 그리고 분무 선단부근에는 분무의 원추단면적이 급격히 증가하고 분무주류로부터 굵은

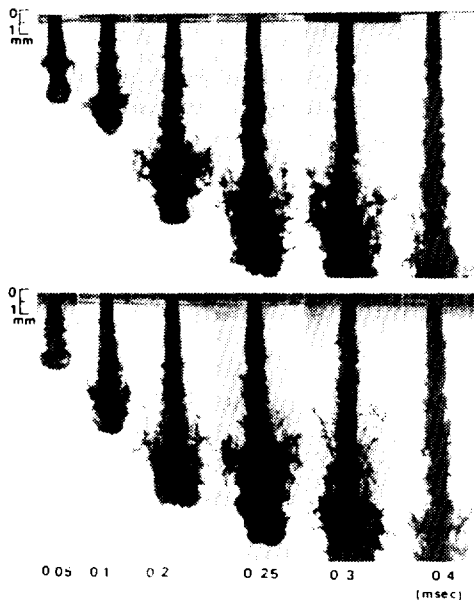


Fig. 4(a). Photographs of developing spray from injection start ($P_i=7\text{MPa}$, $P_a=0.1\text{MPa}$, $T_f=50^\circ\text{C}$ (upper), 150°C (under).

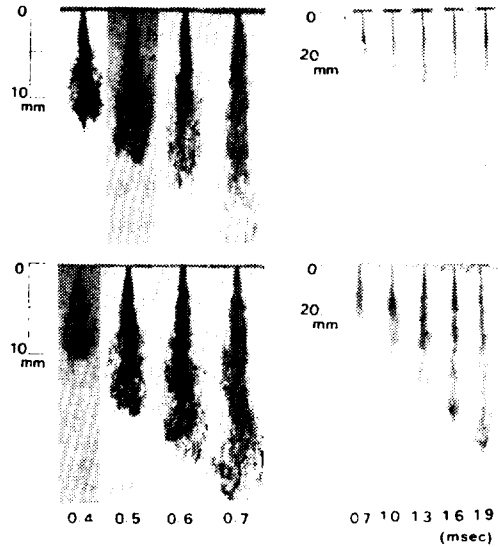


Fig. 4(b). Photographs of developig spray from injection start ($P_i=7\text{MPa}$, $P_a=0.1\text{MPa}$, $T_f=50^\circ\text{C}$ (upper), 150°C (under))

액사가 발달되면서 미분열 액주가 분열되고 있음을 보여준다. Fig(b)에서 분사시간이 0.4, 0.7, 1.0, 1.3, 1.6ms로 길어짐에 따라 분산이 더욱 촉진되어 분무가 분열되어 완전히 발달하고 있으며 분무의 형상은 주류역(Main jet)과 혼합류역(Mixing flow)의 두 영역으로 나누어지고 있다. 사진으로부터 연료온도가 50℃인 경우는 주류역과 혼합류역의 구분이 뚜렷한데 반하여 150℃인 경우는 두영역이 상존하여 분류의 분열을 보다 촉진시키고 있음을 알 수 있다. 또한 혼합영역에서는 액적의 중발 현상이 관찰되고 있으며 분무선단도달거리의 거의 같으나 분무의 분산체적이 증가하고 있다. 따라서 연료유의 예열온도를 높임으로써 분무의 분열을 촉진시킬 수 있으며 이는 분사초기의 액체분무류의 Nonatomizing jet를 Atomizing jet로 전환할 수 있다.

Fig. 5는 분사압력이 21MPa이고 연료온도가 각각 50℃ 및 150℃, 분위기 압력이 3MPa인 경우 분무의 발달과정을 나타내고 있는데, 이것은 연료를 예열하여 분위기압력에 분사시킬 경우 예열효과가 분위기하에서의 분무의 발달과정에 미치는 영향

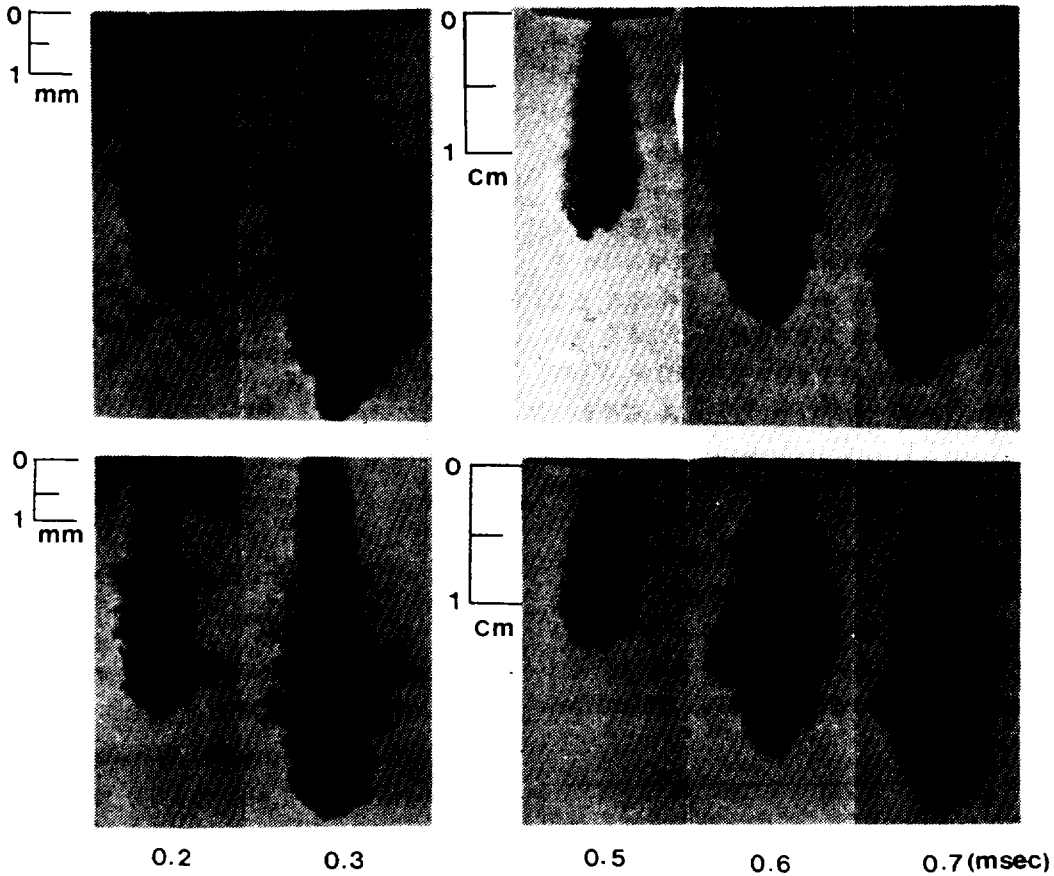


Fig. 5. Photographs of developig spray from injection start ($P_i=21\text{MPa}$, $P_a=3\text{MPa}$, $T_f=50^\circ\text{C}$ (upper), 150°C (under).

을 보여주고 있다. 사진으로 부터 분사직후 분무는 대기압의 분위기와 마찬가지로 미분열 액주상태이며, 액주표면으로 부터 미세한 파가 발생하여 성장 발달하고 있다. 시간이 경과됨에 따라 액주 표면의 미세한 파로 부터 액사가 형성되며 액적이 발생하고 있다. Fig. 4의 대기압하인 분무와 비교할 때 분위기압력이 대기압보다 높은 경우의 분무는 분무선단속도가 감소되어 반경방향으로 분산이 촉진되며 액주가 원추형태를 이루고 있다. 또한 분위기압력의 영향으로 분무선단부는 발달이 지연되나 연속적인 분사를 때문에 반경방향으로 분산되는 액사는 축방향과 마찬가지로 분위기압력이 작용하므로 대기압에서 처럼 액사가 길게 발달하지 못하고 분열되어 액적을 생성하고 있다.

150°C로 예열한 경우의 분무는 50°C와는 다르게 분사노즐직후 부터 액주의 표면으로 부터 파가 발생하고 이 파의 파장은 짧고 파로 부터 생성된 액사는 가늘고 미세하다. 예열된 연료의 분무는 분사직후 부터 액사 형성 및 분열을 촉진시켜 미립화를 증대시키고 있다.

이는 예열된 연료가 노즐입구의 교축현상으로 인한 압력강하 및 그에 따른 포화증기압 근방의 파도현상으로 기포발생에 기인하는 것으로 예측되며, 또한 표면장력과 점성계수의 감소로 인하여 분류의 미립화에 소요되는 운동량이 감소로 분무의 분산이 증가하고 있다고 사료된다.

한편 표 2는 분사압력이 일정한 경우 연료온도가 상승하면 연료유량은 거의 일정하나 동점성계수와

표면장력이 급격히 감소하고, 포화증기압이 상승하고 있다. 즉, 위 사진관찰 결과로부터 연료온도의 상승은 분류의 분열을 보다 촉진시키므로써 실용기관의 분사계를 바꾸지 않고 분무상태를 개선시켜 양호한 연소조건을 실현시키는 가능성을 보여주고 있다.

또한 시간경과에 따른 분무의 발달과 분산을 보다 정량적으로 구명키위해 분무선단 도달거리와 분무각을 구하였다. 즉 위 사진으로부터 임의의 시간에서 분무선단입자의 도달거리(Y)와 Y/2에서 분무폭(X)을 측정하여 분무선단도달거리(Y)와 분무각($\theta = 2\text{tan}^{-1}\{(X/2)/(Y/2)\}$)을 구하여 그 결과물 Fig. 6, 7, 8, 9, 10, 11에 나타내었다.

Fig. 6과 7은 분사압력이 7MPa이고 연료온도가 상온, 50°C, 100°C 및 150°C, 분위기압력이 0.1 MPa, 1.5MPa 및 3MPa인 경우 시간 경과에 따른 분무선단도달거리와 분무각을 나타낸다.

Fig. 6로 부터 대기압하에 분사되는 경우 예열온도에 관계없이 분무선단도달거리의 기울기는 약 1인 직선이고, 분위기압력이 1.5MPa, 3MPa로 증가

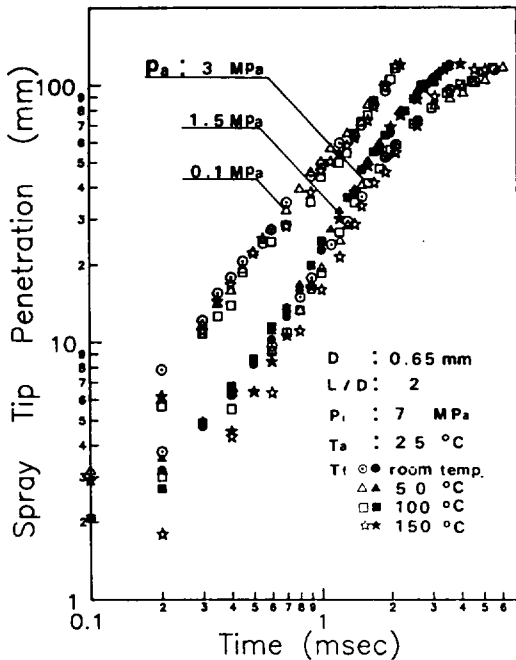


Fig. 6. Influence of ambient gas pressure and fuel temperature on spray tip penetration.

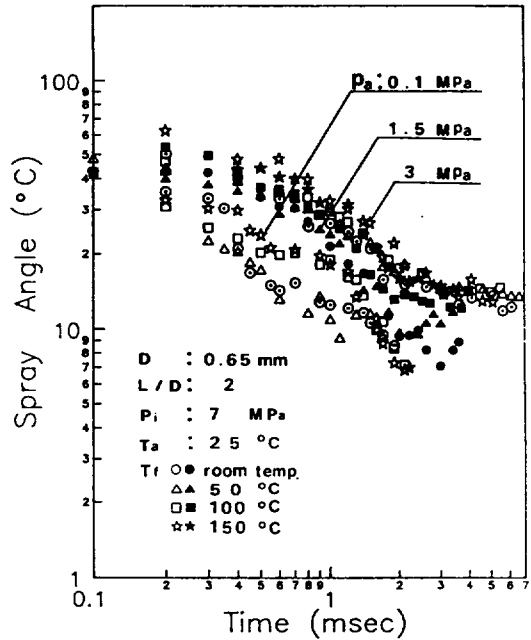


Fig. 7. Influence of ambient gas pressure and fuel temperature on spray angle.

할수록 분무선단거리가 현저히 짧아지며 천이점이 일찍 발생하고 천이점 이후 기울기는 약 0.5인 직선이다. 그러나 예열온도가 상온에서 150°C로 증가할 경우에는 분무선단도달거리가 현저히 짧아지고 천이점 발생 시간이 늦어지고 있다. 이 결과는 일정 분위기압력하에서의 발생한 천이점이 연료의 온도를 상승시킴으로써 천이점 발생이 오히려 지연되어 분무관통도의 증대 효과를 얻을 수 있다.

Fig. 7로 부터 분무각은 분위기압력의 증가에 따라 크게 나타나나, 분사직후 부터 점차 감소하여 일정시간 경과 후 일정하다. 이 일정한 값에 도달되는 시간은 분무선단의 천이시간과 거의 같다. 분무가 0.1MPa, 1.5MPa 및 3MPa의 분위기압력하에 분사될 경우 예열온도 상승에 따른 분무각은 분사초기에는 영향을 받으나 분사개시 후 각각 1.5ms 및 2.0ms 이후 예열온도에 관계없이 일정하다. 분사분위기압력이 1.5MPa인 경우 전 분사 과정을 통하여 예열온도가 증가하면 분무각이 증가한다. 특히 예열온도 150°C일 때 분무각은 분위기압력이 3MPa에서 분무각과 거의 같은 값을 가지며 따라서 연료의 예열온도상승은 분무각의 급격한 증가효과

를 가져오는 것을 알 수 있다.

Fig. 8과 9는 분사압력이 14MPa이고 연료온도가 상온, 50°C, 100°C 및 150°C, 분위기압력이 0.1 MPa, 1.5MPa 및 3MPa인 경우 시간 경과에 따른 분무선단도달거리와 분무각을 나타낸다.

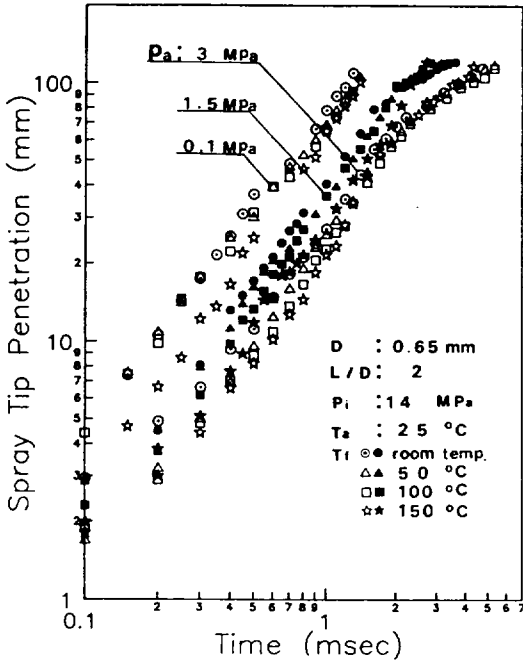


Fig. 8. Influence of ambient pressure and fuel temperature on spray tip penetration.

Fig. 8로 부터 분무선단도달거리는 분사 시간의 경과함에 따라 분위기압력 증가에 무관하게 Fig. 6 과 같이 기울기가 1에서 0.5로 천이되고 있다. 또한 연료를 예열했을 경우도 거의 같은 경향을 보여 주고 있다. 0.1MPa, 1.5MPa의 분위기조건에서 연료온도의 상승은 분무선단도달거리를 감소시키며, 특히 1.5MPa, 150°C의 조건에서 분무선단도달거리는 3MPa의 분위기압력에서 분무선단도달거리와 거의 같아 100°C이하의 예열온도와 현저한 차이를 나타낸다. 그러나 3MPa의 분위기조건에서는 예열온도의 증가에 따른 분무선단도달거리 변화가 거의 없다. Fig. 6과 마찬가지로 분무선단의 천이는 연료온도가 높을수록, 분위기압력이 낮을수록 늦게 발생하였다.

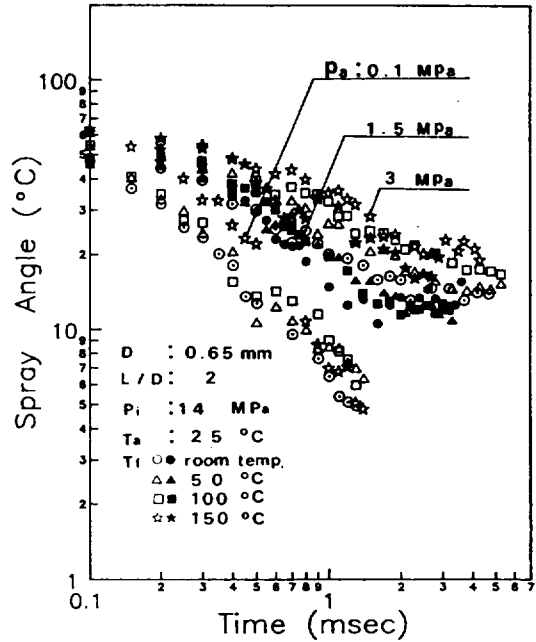


Fig. 9. Influence of ambient gas pressure and fuel temperature on spray angle.

Fig. 9로 부터 0.1MPa의 분위기조건에서 예열온도가 분무각에 미치는 영향은 작다. 그러나 1.5 MPa의 분위기압에서 분무각은 연료온도가 150°C에서 상온, 50°C, 100°C보다 현저히 커지며 3MPa의 상온 및 50°C에서의 분무각보다 오히려 큰 값을 갖는다. Fig. 4, 5와 비교 검토할 때 연료온도의 상승은 분무관통도를 억제하고 분산을 증대시키는 효과를 가져온다고 볼 수 있다. 3MPa에서 분무각은 상온 및 50°C에서의와 같은 경향을 나타내나, 100°C, 150°C에서 뚜렷한 증가를 보이고 있다.

Fig. 10과 11은 분사압력이 21MPa이고 연료온도가 상온, 50°C, 100°C 및 150°C, 분위기압력이 각각 0.1MPa 및 3MPa인 경우 시간 경과에 따른 분무선단도달거리와 분무각을 나타낸다.

Fig. 10로 부터 분위기압력이 0.1MPa에서 분무선단도달거리와 분무각은 예열온도에 큰 영향을 받지 않는다는 것을 보여주고 있다. 분위기압력이 3MPa인 경우에 있어서 연료온도가 상온인 경우 천이점은 약 1.2ms이고 50°C에서는 1.8ms이며 150°C에서는 약 2.5ms이다. 이는 연료온도의 증가가 천이점 발생시간을 지연시켜 오히려 분무관통도의 증

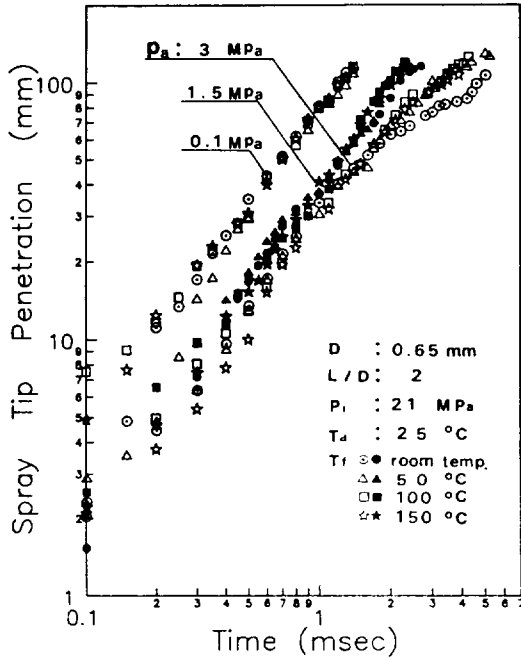


Fig. 10. Influence of ambient gas pressure and fuel temperature on spray tip penetration

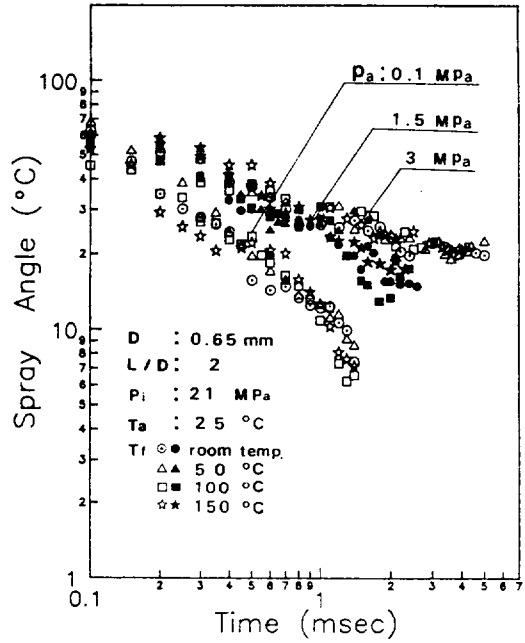


Fig. 11. Influence of ambient gas pressure and fuel temperature on spray angle.

가에 기여하고 있음을 보여주고 있다. Fig. 11은 연료온도가 상승하여도 분무각은 거의 변화가 없으며 분위기조건에 무관하다는 것을 보여준다. 또 분위기압력이 상승하면 분무각은 현저히 커짐을 보여준다.

3. 완전히 발달된 분무의 분무각

Fig. 12는 연료온도가 상온, 50°C, 100°C 및 150°C, 분사압력이 7MPa, 14MPa 및 21MPa이고, 분위기압력이 0.1MPa, 1.5MPa 및 3MPa인 경우 완전히 발달된 분무의 분무각을 나타낸 그림으로, 연료의 예열온도, 분사압력 및 분위기압력 이 변화할 때 분무각에 미치는 영향을 보여준다.

분위기압력이 0.1MPa일 경우는 전 분사압력에 있어서 연료의 예열온도가 분무각에 큰 영향을 미치지 않는다는 것을 보여주고 있다. 그러나 분위기압력이 1.5MPa에서는 연료온도가 100°C 및 150°C에서 분무각이 급격히 증가하고 있으며, 분위기압력이 3MPa에서는 150°C에서 급격히 증가하고 있다. 연료온도가 증가하면 점성계수가 떨어져 분사율이

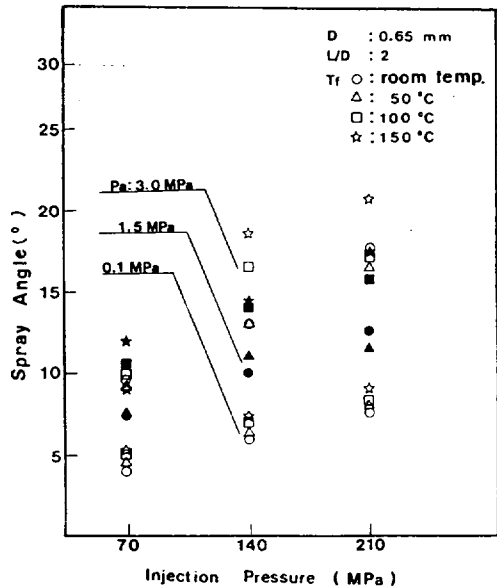


Fig. 12. Influence of ambient gas pressure and fuel temperature on spray angle in case of fully developed spray.

조금 증가하나(표 2참조) 일정하다고 하면 분무각의 급격한 증가는 분무체적이 증가하여 미립화가 촉진되었다고 볼 수 있다. 이것은 연료온도가 높아지면 분무의 분산체적이 증가하여 연료의 미립화가 촉진됨을 알 수 있다.

결 론

본 연구는 소형 고속디젤기관용 단공노즐을 시험노즐로 하고 공급연료를 고온으로 예열하여 상온의 분위기압력에 분사하였을 경우 연료유 분무의 분산특성을 구명하는데 그 연구목적에 두었다.

본 연구에서는 분사초기의 분무 형성과정과 그 분열 발달과정, 그리고 충분히 발달될 때까지 분무형상을 스트로보광원에 의한 고속직접사진과 나노라이트 광원의 고속순간 확대사진으로 상세히 관찰하였으며, 특히 시간경과에 따라 발달과정인 분무의 분무각과 분무선단도달거리를 실험적으로 구명하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 분사초기에 형성된 교란되지 않은 미분열 액주길이는 연료온도를 높이면 상온의 경우에 비하여 현저히 짧아지고, 또 분무가 성장함에 따라서

액주 표면파로부터 보다 미세한 액적군이 형성되어 이들이 분열에 의한 액적발생이 매우 왕성하다. 따라서 연료유의 예열온도를 높임으로써 분무의 분열을 촉진시킬 수 있으며 이는 분사초기의 액체분무류의 Non-atomizing jet를 Atomizing jet로 전환할 수 있다.

2) 분위기압력을 높이면 분무는 직선적으로 성장 발달하나, 분사 시간이 어느 일정시간에 달하면 천이점이 존재하고, 천이점 이후 분무선단속도가 급격히 감소한다. 연료유의 예열온도를 높이면 분사선단도달거리가 상온인 경우에 비하여 현저히 짧아지나 천이점 발생 시간은 늦어지고 있다.

3) 연료유의 예열온도를 높임으로써 연료의 온도가 증가하면 분사초기의 분무각은 상온인 경우보다 커지며 분사시간이 경과함에 따라 분무각은 더욱 증가하고 있다.

4) 완전히 발달된 분무의 형상으로 부터 예열온도가 분무의 분산에 미친 영향은 분위기압력이 대기압인 경우 매우 작으나, 분위기압력이 1.5MPa, 3MPa로 높은 경우에 연료온도가 증가하면 분무각이 급격히 증가하여 분무의 분산을 증진시킨다.

참 고 문 헌

- Chigier, N., 1981, Energy, Combustion and Environment, McGraw-Hill Book Co., : 315-316.
- Hiroyasu, H., Shimizu, M. and Arai, M., 1988, Break-up Length and Spray Formation Mechanism of a High Speed Liquid Jet, ICLASS-88, : 177-184.
- Hiroyasu, H., Arai, M. and Tabata, M., 1988, The SMD of a Diesel Spray in an Elevated Pressure Environment, ICLASS-88, : 405-410.
- Lienhard, J. H., 1966, An Influence of Superheated upon the Spray Configurations of Superheated Liquid Jets, ASME Journal of Basic Engineering, : 685-687.
- Lienhard, J. H. and Day, J. B., 1970, The Break-up of Superheated Liquid Jets, ASME Journal of Basic Engineering, : 515-522.
- Murayama, T., Oh, Y. T., Takemi, C. and Miyamoto, N., 1987, Effects of Super Heating of Heavy Fuels on Combustion and Performance in DI Diesel Engines", SAE Paper, No. 860306.
- Kitamura, Y., Morimitsu, H. and Takahashi, T., 1986, Critical Superheat for Flashing of Superheated Liquid Jets, Ind. Eng. Chem. Fundam., 25, : 206-211.
- Miyatake, O., Tomimura, T., Ide, Y. and Fujii, T., 1981, An Exerimental Study of Spray Flash Evaporation, Desalination, 36, : 113-

- 128.
- Miyatake, O., Tomimura, T., Ide, Y. and Fujii, T., 1981, Effect of Liquid Temperature on Spray Flash Evaporation, Desalination, 37, : 351-366
- Nagai, N., Sato, K. and Lee, Ch. W., 1985, Atomization Characteristics of Superheated Liquid Jets, ICLASS-85, : VB/3/1-VB/3/11.
- Rajahekhar, D. O. and Sinnamon, J. F., 1984, "An Experimental and Analytical Study of Flash Boiling Fuel Injector, SAE Paper, No. 830590.
- Solomon, A. S. P., Chen, L. D. and Faeth, G. M., 1982, Investigation of Spray Characteristics for Flashing Injection of Fuels Containing Dissolved Air and Superheated Fuel, NASA Contractor Report 3563.
- 허종철, 이규영, 1993, 노중형상비가 발달과정인 디젤부분에 미치는 영향, 제주대학교 논문집(자연), 37 : 191-200.