

초고압 경유-물 혼합연료의 분무특성에 관한 연구

A Study on Spray Characteristics of Diesel-Water Emulsion with Ultra High Pressure

정대용* · 이종태**
D. Y. Jeong, J. T. Lee

ABSTRACT

Spray characteristics on diesel-water emulsion are analyzed in high pressure injection for several variables such as water content, injection pressure. Spray patterns were visualized under various water content and injection pressures. Spray tip penetration was increased and spray angle decreased in accordance with increasing of water content. But these characteristics were enhanced with increase of injection pressure to high pressure.

주요기술용어 : Free Spray(자유분무), High Pressure(초고압), High Pressure Injection Equipment (초고압분사장치), Diesel-water emulsion(경유-물혼합연료), Spray characteristics (분무특성)

1. 서론

연료로 경유-물 혼합연료를 초고압 분사하면 물의 증발잠열증가에 의한 연소온도의 저하, 물의 급격한 증발에 의한 유적의 미세폭발, 수증기와 연료증기 사이의 수성가스반응, 분무연료의 밀도증가에 의한 분무관통력의 증가 등에 의해 NOx 및 soot의 동시저감이 가능하다. 또한 연료를 고압으로 분사하면 분무입자의 운동에너지가 증가하여 분무도달거리 및 분무각이 증가하고 분무속도 증가에 따른 전단력 증가로 미립화가 촉진된다. 미립화 및 관통력의 증가는 연료의 기화를 촉진시키고 공기 이용율을 증가시켜 출력의 향상을 도모할 수 있는 장점이 있다.

E. M. Afify¹⁾와 Crookes²⁾ 등은 혼합연료사용에 따른 제반연소특성을 해석하였다. 또한 R. Schwartz³⁾, G. Stump⁴⁾와 K. Oblaender⁵⁾ 등은 고압분사에 따른 연소특성을 해석하였다.

그러나, 혼합연료를 2000bar 정도의 초고압

으로 분사한 경우의 분무특성 해석에 관한 연구는 아직 명확하게 보고되지 않은 실정이다.

본 연구에서는 디젤기관에 경유-물 혼합연료를 초고압 분사에 따른 분무특성을 파악하기 위하여 경유-물 혼합 연료를 대기중으로 초고압분무하고 가시화를 통하여, 분사압력 2,000 bar까지의 초고압 분사에 따른 혼합연료의 분무특성을 해석하고자 하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

Fig. 1은 초고압 자유분무의 양상을 가시화하기 위한 실험장치의 개략도를 나타낸 것이다. 실험장치는 크게 극초고압분사장치, 분무가시화장치, 제어장치 및 데이터 취득장치로 구성된다.

극초고압분사장치는 Fig. 2에 나타난 바와 같이 연료를 1차 가압하는 1단 압축부, 풀린

* 정회원, 성균관대학교 원

** 정회원, 성균관대학교

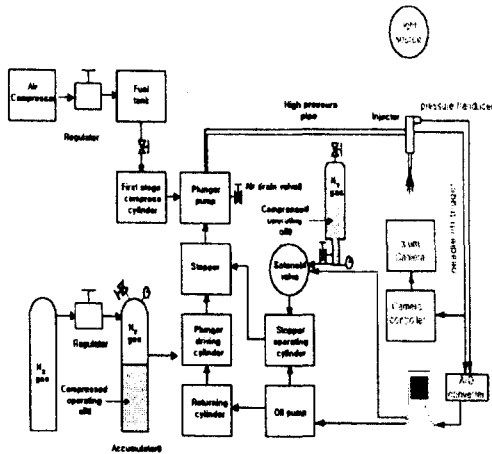


Fig.1 Block diagram of experimental apparatus.

서 펌프에 의해 2차 가압하는 2단 압축부, 플런저구동용 실린더를 원상태로 복귀시키는 복귀장치부로 구성된다. 극초고압의 달성에는 플런저펌프에 공급하는 연료의 초기압력을 별도의 압축펌프로 가압하여 플런저펌프에 공급한 후 고압의 작동유로 작동되는 플런저구동 유압실린더에 의해 급속히 압축하는 방식이 사용되었다. 본 분사장치로 달성 가능한 분사압력은 실용분사압력 약 3,200bar정도의 극초고압의 실현이 가능하였다.

고압인젝터는 특수 제작한 분사공 직경 $d = 0.25\text{mm}$ 분사각 150° , 분공수 5개인 DLL-S type의 인젝터를 개조하여 사용하였다.



Fig. 2 Photograph of high pressure injection system.

2.2 분무가시화장치 및 방법

Fig. 3은 분무양상 가시화장치의 개략도를 나타낸다.

분무가시화장치는 연료를 분사하는 고압분사장치부, 광원부, 분무된 연료를 가시화할 수 있는 가시화부로 구성된다. 분무가시화는 그림에서 보는 바와 같이 광원을 카메라 앞에 두고 카메라와 광원사이에서 연료를 분사시켜 분무를 가시화하는 새도우그래피 방식으로 촬영하였다. 광원으로는 650W의 trugen-halogen램프 2개를 사용하였다. 또한, 광원과 카메라 사이에 투명한 스크린을 두어 빛이 균일하게 산란될 수 있도록 하였다. 순간적으로 분사되는 분무의 시간경과에 따른 발달과정을 관찰하기 위하여 고속의 드럼카메라(Cordin 350)를 사용하였다. 고속드럼카메라는 회전프리즘 형식의 반사경의 회전을 통해 최대 35,000 F/S으로 분무양상을 촬영할 수 있다. 필름은 Kodak사의 ASA400의 32mm 필름을 사용하였다. 렌즈는 35-105mm 줌 렌즈(Nikon)를 사용하였다.

분무가시화를 위한 시간제어 순서는 고압분사장치의 작동신호가 computer에 의해 발생되고 이 신호는 고압분사장치의 stopper를 작동시킨다. Stopper가 열림과 동시에 연료펌프를 구동시키는 유압실린더가 작동을 하고 유압실린더는 연료펌프를 구동시킨다.

연료펌프가 구동하기 이전 즉 연료가 분사

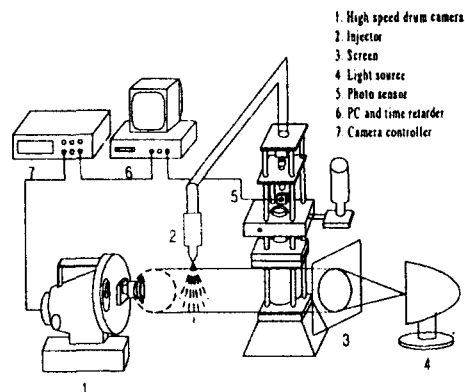


Fig. 3 Visualization system of high pressure spray.

되기 이전에 유압실린더의 위치를 광센서(BF3RF)가 검출을 하고 검출된 신호는 인터페이스를 거쳐 컴퓨터로 입력된다. 그리고 일정시간 지연된 후 카메라 controller에 신호를 주어 분무가 되기 직전부터 분무양상을 촬영하였다. 연료분사는 대기중으로 하였다.

분무가시화를 위한 실험변수는 경유-물 혼합연료의 함유율과 분사압력이다. 함유율은 체적비로 0%에서 30%까지 단계적으로 변화시켰다. 경유-물 혼합연료의 제작에는 유화제를 사용하였다.

연료분사압력의 변화는 600bar에서 2,000bar까지 단계적으로 변화시켰다. 분무가시화를 위한 카메라의 촬영속도는 14,000F/S 로 하였으며, $f = 60$ 으로 설정하였다.

3. 초고압 혼합연료의 분무특성

3.1 함유율 변화시의 분무특성

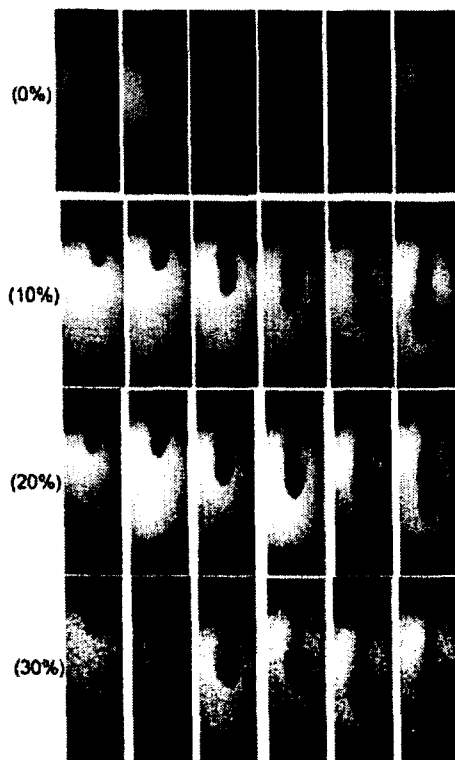


Fig. 4 Photograph of spray for water content at 600bar.

3.1.1 함유율 변화에 대한 분무양상

Fig. 4 는 경유-물 혼합연료의 함유율을 증가시킨 경우의 분무양상을 가시화한 결과이다.

여기서, 분사압은 600bar이며, 인젝터쪽의 연료공급관에서 측정된 압축압력의 최대치이다. 분사시의 분위기 압력은 대기압이다.

순수경유, 즉 함유율이 0%인 경우 분무초기의 분무는 고농도의 원추형 액주 상태에 가까우며 액주의 외피에 작은 액적들이 생기는 것을 나타낸다. 액적은 분사개시 후 약 30 μ s 부터도 벌써 분무 주위에 안개처럼 형성되며, 이후 반경방향으로 급속히 퍼져나가는 것을 보이고 있다. 이는 분무가 성장하면서 분무가 주위의 공기와의 상호 전단작용에 의해 미립화되고 있음을 보이는 것이다. 분무가 성장한 단계에서는 분무의 미립화가 급격히 일어나고 분무의 외피와 선단 부분에서도 안개와 같은 작은 액적들이 반경방향으로 흩어져 나가는 것을 보인다.

한편 경유연료에 물을 첨가한 혼합연료를 사용한 경우로서, 함유율이 10%인 혼합연료의 경우의 연료분사 초기의 분무양상은 순수경유의 경우에 비하여 그리 큰 차이를 보이고 있지 않다. 그러나 시간이 경과함에 따라 분무선단의 끝이 뾰족한 형상으로 변화하는 것을 나타낸다. 또한, 분무외피가 매끈한 형태로 되며, 반경방향으로 퍼져나가는 분무액적이 순수경유의 경우에 비해 감소하는 현상을 보이고 있다.

함수율 20%인 경우에는 함유율 10%에 비해 분무선단의 형상이 더욱 뾰족하며, 분무외피도 매끈하게 되는 것을 보이고 있다. 순수경유인 경우와 함유율 10%인 경우에는 시간이 경과함에 따라 분무선단의 액주 부분에 안정된 듯이 곧은 부분과 분열되어 불안정해지면서 액주가 흔들리는 부분이 발생하며, 액주 선단에 분무입자가 휘날리는 모습을 볼 수 있다. 그러나 함유율 20%인 경우에는 이러한 현상이 급속히 감소된 양상을 보이고 있다.

함수율 30%인 경우는 분무초기부터 분무선단의 모양이 다른 함유율의 경우에 비해 뾰족한 모양이며, 분무외피 역시 매끈한 것을 나타

내고 있다. 그리고, 함수율 20%의 경우에서 나타난 분무액주의 흔들거림은 거의 보이지 않는다.

이와 같이 분무형상은 혼합율이 증가함에 따라 분무액주가 매끈한 형상을 하고, 분무액주의 분열이 감소하며 분무액적의 퍼짐정도가 감소되는 것을 알 수 있었다. 이 경향에 대한 정량적 해석은 다음과 같은 분무도달거리 및 분무각으로 파악하였다.

3.1.2 분무도달거리

Fig. 5는 분사개시 후 시간경과에 따라 분무선단이 도달하는 분무도달거리를 상기의 가시화 결과로부터 구해 각각의 함수율에 대하여 나타낸 것이다. 여기서, 분무도달거리는 분무액적들이 노즐 팁에서 가장 멀리 떨어진 위치까지로 정의하였다.

각 함수율에 대한 분무도달거리는 모두 분사개시 후 분무선단이 가지고 있는 운동에너지의 산일로 인하여 시간이 경과함에 따라 지수함수적으로 증가하는 경향을 보이고 있다.

그리고, 함수율이 증가할수록 분무도달거리는 증가하며, 분무도달거리의 증가폭은 함수율의 증가에 따라 전반적으로 커지는 경향이다.

경유-물 혼합연료의 밀도는 함수율이 증가함에 따른 물 첨가량의 증가로 증가된다. 또한 연료의 밀도 증가에 따라 분무입자의 표면

장력은 증가하며, 이것은 연료입자의 미립화를 감소시키는 역할을 한다.⁷⁾ 따라서, 함수율이 증가함에 따라 분무도달거리가 증가하고 또한 분무도달거리의 증가폭이 커지는 것은 물 첨가량의 증가로 인한 혼합연료의 밀도 증가와 연료 입경의 증가로 인한 분무에너지의 증가에 기인하는 것으로 판단된다.

분무도달거리는 함수율이 30%인 경우 순수 경유에 비해 최고 약 12%정도 증가함이 보여졌다.

3.1.3 분무각

Fig. 6은 분사압력이 600bar인 경우 함수율의 변화에 대한 분무각 변화를 시간 경과에 따라 나타낸 것이다. 여기서, 분무각은 분무난류확산부의 접선이 서로 이루는 각이다.

각각의 함수율에 대한 분무각은 모두 분무초기에 다소 큰 경향이나 시간이 경과할수록 일정한 값으로 수렴함을 보이고 있다.

그리고, 혼합연료를 사용하는 경우의 분무각은 순수경유에 비해 약간 감소하는 경향이지만, 함수율이 증가하더라도 뚜렷한 차이를 보이지 않고 있다.

전술한바와 같이 경유연료에 물을 첨가하는 것은 연료입자의 미립화를 억제하며, 이로 인해 순수경유연료에 비해 분무도달거리가 증가하는 반면에 분무각이 상대적으로 약간 감소하

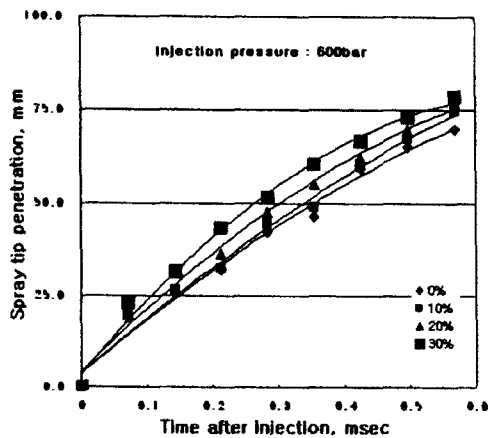


Fig. 5 Spray tip penetration at each water content with injection pressure 600bar.

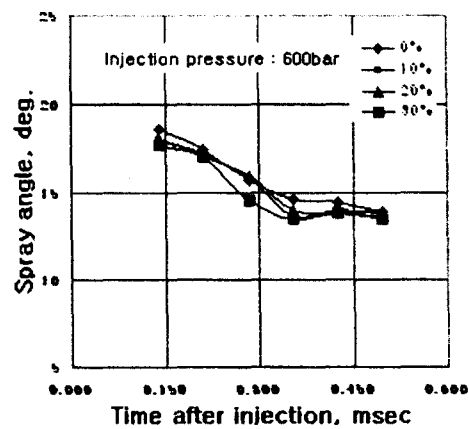


Fig. 6 Spray angle at each water content with injection pressure 600bar.

는 것으로 생각된다.

그러나, 순수경유의 경우에 비해 감소되는 분무각은 함수율이 30%에서 최대 약 1.2° 정도이므로 함수율 변화에 따른 분무각의 변화는 그리 큰 차이가 없는 것으로 볼 수 있다.

3.2 혼합연료의 초고압분무특성

3.2.1 초고압분무양상의 가시화

경유-물 혼합연료를 초고압 분사한 경우의 분무양상 가시화 결과를 각각의 함수율에 대해 나타낸 것이 Fig. 7이다. 여기서 분무양상은 모두 분사후 0.3ms 시점에서 가시화한 결과를 대표적으로 나타낸 것이다.

혼합율이 0%인 순수경유의 경우, 분사압력 600bar에서의 분무양상은 Fig. 4에서 논한 바와 같이 분무 외피 부분에 약간의 안개와 같은 엷은 분무 액적들이 보이지만 고농도의 매끄러운 원추형 액주 상태에 가깝다.

이를 초고압 분사하는 경우 분무의 성장은

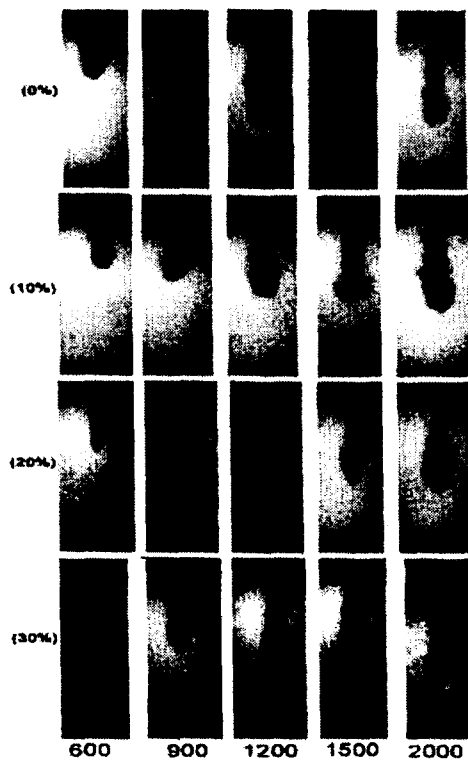


Fig. 7 Photograph of spray for injection pressure at 0.3msec

급속해져 관통력이 크게 증가하며, 분무액적들이 반경방향으로 넓게 퍼져나가는 모양이 관찰된다. 이러한 경향은 분사압력이 1,200bar로 증가할 때까지 뚜렷이 나타난다. 그러나, 이보다 분사압력을 더욱 증가시키면 분무의 개선효과가 감소되어, 분사압력이 2,000bar인 경우라도 1,200bar의 경우에 비해 약간 관통력이 증가하고 분무액적이 조금 더 퍼져나가는 양상을 나타내고 있을 뿐이다.

경유-물 혼합연료를 고압으로 분사한 경우는 순수경유를 사용한 경우에 비하여 분무의 성장이 급성장하여 관통력 및 분무액적의 확산 정도가 증가하지만 1200bar까지의 분무선단 양상은 여전히 보족한 형태를 보이고 있다. 이러한 양상은 함수율이 증가할수록 현저하게 된다. 그러나 1,200bar 이후의 분무선단은 순수 경유와 유사하게 많이 무더지고 분무액적의 퍼져나감 정도도 모든 함수율에 대해 유사한 양상을 보이고 있다. 특히 함수율 30%의 혼합 연료를 600bar로 분사하는 경우 액주부분의 흔들거림이 거의 없는 양상인 반면에 이를 초고압화한 결과 액주분열 현상이 확연히 나타나는 것을 보이고 있다.

3.2.2 분무도달거리

Fig. 8은 혼합연료를 초고압화 한 경우의 분무도달거리를 분사압력에 대해 나타낸 것이다.

분사압력을 초고압화 함에 따른 각 함수율에 대한 분무도달거리는 지수함수적으로 증가하는 경향을 보인다. 즉, 분사압력을 초고압으로 증가시키는데 따른 분무도달거리는 분사압력 약 1,200bar까지 거의 선형적으로 증가하다가, 그보다 더 초고압화 하면 증가하는 경향은 동일하나 증가폭은 완만해 지는 것을 나타내고 있다.

분사압력을 고압화 하면 연료에 공급되는 압력에너지의 증가로 분사되는 분무입자의 분출속도는 증가하게 된다. 그러나 이와 동시에 분사압력이 고압화 되면 노즐 출구로부터 연료의 무화가 진행된 상태로 분사되고 또한 주위 공기와와의 큰 전단력 차이로 더욱 미세한 액적

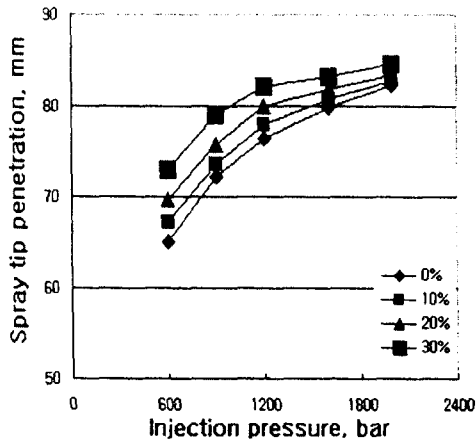


Fig. 8 Spray tip penetration at each water content as a function of injection pressure.

들로 무화된다. 상기와 같은 분무입자의 분출 속도 증가와 분무입경이 작아지는데 따른 질량 감소의 영향으로 고압분사되는 분무입자의 운동에너지가 결정된다. 이와 같은 분출속도와 분무입자질량의 상관관계에 의해 혼합연료를 초고압화 하는데 따라 분무도달거리가 선형적으로 증가하다가 완만히 되는 것으로 생각된다.

각각의 혼합연료를 1,200bar, 2,000bar로 분사한 경우 분사압력 600bar에 대해 합수율

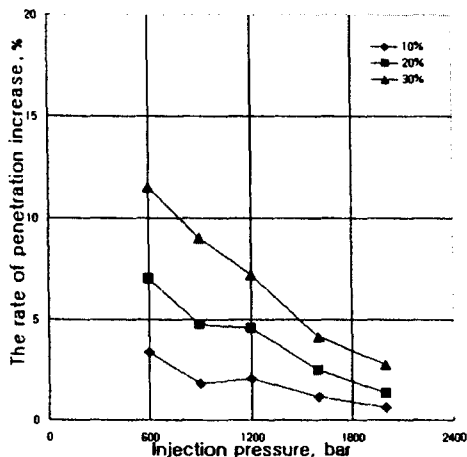


Fig. 9 Increasing rate of penetration as a function of injection pressure with water content.

10%의 경우 약 16%, 23%정도 증가함을 나

타내다. 그리고, 합수율 20%인 경우 약 15%, 20%, 합수율 30%일 때 약 12%, 16%정도 증가함이 보여졌다.

한편, 혼합연료는 경유보다 밀도가 큰 물성분의 첨가로 인하여 분무입자의 밀도가 증가된다. 따라서 연료의 밀도가 따른 영향이 분무도달거리에 반영될 것이다.

이러한 경향을 알아보기 위하여 각각의 합수율에 대해 분사압력을 증가시킨 경우의 분무도달거리를 순수경유에 대해 백분율한 분무도달거리 증가율을 구하였으며, 그 결과를 Fig. 9에 나타낸다.

그림에 나타난 바와 같이 각각의 합수율에 있어서, 분사압력 증가에 대한 분무도달거리 증가율은 전술한 원인에 의해 감소하는 경향을 보이고 있다. 그리고, 각 분사압력에 대해 합수율이 증가함에 따라 분무도달거리의 증가율은 증가하나 분사압력이 증가할수록 증가폭은 감소함을 보인다.

합수율 10%의 혼합연료를 1,200bar, 2,000bar로 분사한 경우 순수경유를 동일압력으로 분사한 경우에 대해 약 2% 및 0.6% 정도 증가함이 보여졌다. 합수율 20%인 경우는 약 4.5%, 1.3%, 합수율 30%인 경우는 약 7.2%, 2.8%정도 증가함을 보이고 있다.

상기와 같은 결과는 혼합연료를 사용하는 경우 분무도달거리의 증가효과는 순수경유만을 사용하는 경우보다 증가하지만, 분사압력을 아주 초고압화하는 경우 합수율 증가에 의한 개선효과가 초고압분사의 영향에 의해 상쇄된다는 것을 보여주는 결과로 볼 수 있다.

3.2.3 분무각

Fig. 9에 순수경유와 합수율 30%인 혼합연료의 분사압력 변화에 대한 분무각 변화를 나타낸다.

분무각은 분무도달거리와 마찬가지로 분사압력이 증가할수록 증가하고 있다. 특히 분사압력 1,200bar까지 큰 폭으로 증가하다가 그 후 증가율이 완만해지는 경향을 나타낸다.

고압분사에 따른 분무각의 현저한 증가는

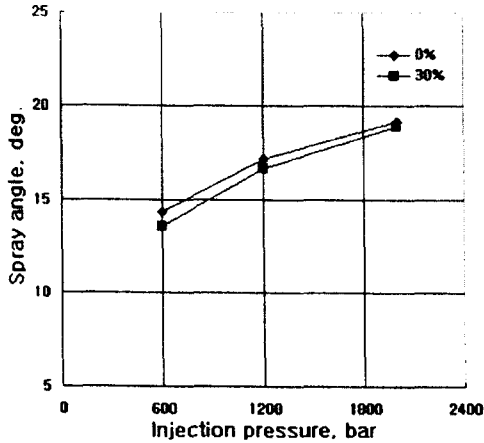


Fig. 10 Spray angle as a function of injection pressure with water content 0%, 30%.

분사초기의 낮은 압력으로 분출된 저속 분무물 후발의 고압분사에 의한 고속분무가 충돌함으로써 앞서 나간 분무를 부수며 반경방향으로 확산시키는데 기인하는 것으로 생각된다. 분무각이 큰 폭으로 증가하는 것은 분사압력의 초고압화로 미립화가 급속히 진행됨을 보이는 것이다. 그리고, 이보다 고압화 하는 경우, 분무각의 증가폭이 완화된 것은 분무입자의 미립화에 의한 입자들의 분무에너지의 감소로 인해 증가폭이 감소하는 것으로 생각된다.

순수경유의 분사압력을 600bar에서 1,200bar 및 2,000bar로 분사하면, 분무각은 각각 약 20% 및 31% 정도 증가함을 보이고 있다. 동일조건으로 합수율 30%인 혼합연료를 분사한 경우 분무각은 각각 약 23% 및 36% 증가함을 보인다. 즉, 혼합연료를 600bar에서 2,000bar로 고압분사한 경우의 분무각 증가는 순수경유를 동일조건으로 고압분사한 경우보다 약 5% 정도 더 큰 것이 보여졌다. 그리고, 혼합연료를 고압화하는 데 따른 분무각의 증가를 순수경유를 고압화하는 경우와 비교하면, 합수율 30%의 혼합연료를 1200bar로 분사한 경우의 분무각은 순수경유에 비해 약 1.9% 증가하고, 이를 2000bar로 분사하게 되면 약 1.6% 정도 증가하는 것이 보여졌다.

이와 같이 혼합연료를 초고압으로 분사하면

분무각의 증가율은 순수경유에 비해 커짐을 알 수 있으며, 또한 분무개선 효과가 크게 나타남을 알 수 있다.

전술한 바와 같이 분사압력의 증가에 따라 분무도달거리와 분무각이 현저히 증가하며, 특히 혼합연료를 사용하는 경우 고압화 하는데 따른 분무특성의 향상은 순수경유를 사용하는 것에 비해 커지는 것을 알 수 있었다. 따라서 혼합연료의 분사압력을 초고압화 하면 분무특성의 개선으로 연료와 공기의 혼합이 양호하게 되며, 이는 연소를 보다 촉진시키리라 예측된다.

한편, 분사압력을 보다 초고압화함에 따라 분무도달거리 및 분무각의 증가율이 완만해지는 것은 분무개선효과가 최대인 적정분사압력과 분무특성이 더 이상 향상되지 않는 임계분사압력이 존재한다는 것을 의미하는 것이다.

4. 결론

초고압 경유-물 혼합연료를 대기중으로 자유분무하여 가시화하고 해석한 분무특성의 결과는 다음과 같다.

1. 합수율을 증가시킴에 따라 분무도달거리는 혼합연료의 밀도증가와 분무입경의 증가로 인한 분무에너지의 증가에 기인하여 증가함을 나타내었다.

2. 합수율 증가에 따른 분무각은 물침가로 인한 연료입자의 미립화의 억제로 인해 상대적으로 약간 감소하는 것을 알 수 있었다.

3. 분사압력을 초고압화함에 따라 분무도달거리는 각 합수율에 대해 분사압력 증가에 의한 분무에너지의 증가에 기인하여 증가하는 것을 알 수 있었으며, 분사압력이 초고압인 경우 합수율의 영향은 작게 나타남을 알 수 있었다.

4. 분무각은 분사압력이 초고압화 되면 노즐 출구로부터 연료의 무화가 진행된 상태로 분사되고 또한 주위공기와 큰 전단력 차이로 더욱 미세한 액적들로 무화되며 이로 인해 크게 증가함을 알 수 있었으며, 분사압력의 증가에 대해 향상폭은 감소함을 나타내었다.

5. 상기의 결과로부터 혼합연료를 초고압으로 분사하면 연료 큰 증발잠열에 의한 실린더내의 온도감소와 분무각 및 분무도달거리의 증가로 인하여 실린더내 연료의 공간분포의 증가로 인한 공기이용율의 증가로 배기배출물의 저감 및 출력의 향상을 동시에 달성할 수 있으리라 예측할 수 있었다.

후 기

본 연구는 한국과학재단의 목적기초연구(R01-2001-00386-000(2002))지원에 의하여 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- (1) E. M. Afify, 1985, "Performance Combustion Characteristics and Exhaust Emission of a Direct Injection Diesel Engine Using Water/Oil Emulsions. as Fuel," North Carolina State University, September 30
- (2) Crookes, R. J., Nazha, M.A.A., Janoter, M.S., Story, T., 1980, "Investigation into the Combustion of Water/Diesel Fuel Emulsion" SAE paper 80094
- (3) G.Stump, W.Polach, N.Muller and J.Warga, 1989, "Fuel-injection Equipment for Heavy Duty Diesel Engines for U.S. 1991/1994 Emission Limits," SAE Trans. NO. 890851,
- (4) R.Schwartz, "High-Pressure Injection Pumps with Electronic Control for Heavy-Duty Diesel Engines," SAE paper 850170
- (5) K. Oblaender, K. Kollmann, M. Kraemer and I. Kutschera, 1989, "The Influence of High Pressure Fuel Injection on Performance and Exhaust Emission of High Speed Direct Injection Diesel Engines," SAE Trans. paper 890438
- (6) Daeyong Jeong, Hyunsang Ha, Jongtai Lee, 1998, "A Basic Study on Combustion of Ultra High Pressure Injection". Autumn conference proceeding of KSAE, pp386-392.
- (7) 통산산업부: "압축점화용 유화연료 이용 기술개발에 관한 연구 보고서," 1995. 12. 31.