

초음파 연료분사장치의 분무특성에 관한 연구

A Study on the Spray Characteristics with Ultrasonic added Fuel Injection System

윤 면 근*, 류 정 인**

M. K. Yoon, J. I. Ryu

ABSTRACT

This experiment was undertaken to investigate spray characteristics of the conventional injection system and the ultrasonic energy added injection system.

Sauter mean diameter was measured under the variation of injection pressure and the spray distance. To measure the droplet size we used the Malvern system 2600C. The spray angle and mass distribution was analyzed to the CCD camera and the patternater.

After experiment, it was found that the ultrasonic energy added injection system had smaller sauter mean diameter of droplet, wider mass distribution and wider spray angle than the conventional injection system had.

주요기술용어 : Fuel spray(연료분사), Atomization(무화), MPI(다점분사), SMD(평균입경), Mass distribution(질량분포), Spray angle(분사각), Ultrasonic added fuel injection(초음파 연료 분사)

1. 서 론

70년대 두 차례에 걸친 oil shock 이후 세계 각국에서는 대기 오염 문제와 에너지 절약 차원에서 대기오염과 연비에 대한 규제가 더욱 엄격해져 왔고 1998년 이후는 탈 석유 연료 기관을 장려하는 움직임이 더욱 거세지고 있다¹⁾.

가솔린기관에서도 예외없이 이런 문제를 해결하기 위하여 많은 연구가 진행되고 있

는 현실이다²⁻⁴⁾.

따라서 본 연구에서는 기존에 사용되고 있는 MPI 가솔린 기관에 적용하기 위하여 연료의 입경을 더욱 미세화 시켜 완전연소를 시도하고자 초음파 연료 분사 시스템을 개발, 부착하여 상용의 연료 분사 시스템과 연료 분무 특성을 비교하고 초음파 에너지 부가시 분무 특성을 규명하고자 한다.

2. 이론적 고찰

*충남대 대학원

**충남대학교

2.1 초음파

음파는 인간의 귀로 포착할 수 있는 가청 음파($f=25\text{ Hz}\sim 15\text{ kHz}$)와 인간이 들을 수 없는 불가청음파로 나누며, 불가청음파는 다시 주파수가 낮은 초저음파($f < 25\text{ kHz}$)와 주파수가 높은 초음파($f > 25\text{ kHz}$)로 나누고, 초음파 중 $f > 1000\text{ kHz}$ 의 초음파를 과초음파라 부른다^{5,6)}.

초음파의 음속은 $c = \lambda f$ 와 같고 액체 매질을 통과할 때의 음파속도는 다음과 같다.

$$c = \left[\frac{\gamma}{\rho\beta_i} \right]^{\frac{1}{2}} = (\rho\beta_i)^{-\frac{1}{2}} \quad (1)$$

이때 λ 는 파장, γ 는 비열비, ρ 는 밀도, β_i 는 압축성을 나타낸다. 따라서 연료에 초음파를 가하면 음파의 전달은 밀도와 압축성에 관계되어진다.

2.2 공동현상

초음파 진동자를 이용하여 연료에 직접적인 방법으로 초음파를 부가할 경우는 진동자 혼(horn)의 신축 진동으로 연료에 공동현상이 발생한다.

Fig.1은 공동현상의 분열 모델을 설명하는 것으로 공동현상이 발생하여 액체를 분열시키는 과정을 설명한 것이다. (A)는 점 또는 구형의 음원에서 매질이 팽창과 압축을 반복하여 소밀파를 형성하며 전파되는 것을, (B)는 음압과 시간의 관계를 나타내고 공동의 형성점과 발달 과정을 음압의 크기에 대하여 표시한 것이고, (C)는 공동의 생성, 발달, 압괴가 일어나는 과정과 이에 의해 액체가 분열되는 것을 나타낸 것이다⁷⁾.

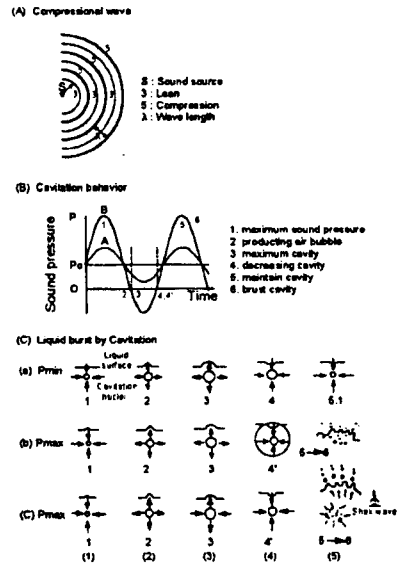


Fig. 1 Model of cavitation burst

2.3 공동현상과 압력 및 온도와의 관계

공동현상 발생시 공동이 극히 작은 경우를 가정하여 Rayleigh⁸⁾와 Noltingk⁹⁾는 물속에 용존되어 있는 공기의 온도 및 압력을 계산하였다. 이때 정수압을 p_1 , 액중 공기의 최초 압력을 p_0 , 최초 액의 온도를 T_1 이라 할 때 기포의 크기가 극소로 되는 때의 온도 T 와 압력 P 를 계산하였다.

$$T = T_1(\gamma - 1) \left(\frac{p_0}{p_1} \right)^{\frac{1}{\gamma}} \quad (2)$$

$$P = p_1(\gamma - 1)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \left(\frac{p_0}{p_1} \right)^{\frac{1}{\gamma-1}} \quad (3)$$

이때 γ 는 정압비열과 정적비열의 비이다.

Noltingk의 연구에 의하면 p_0/p_1 을 2×10^{-3} 으로 할 때 기포 내의 온도 및 압력은 대기압 및 상온을 기준으로 하면 수만 배가 된다. 기공내의 압력이 어느 정도 인지

확실치는 않지만 수천~수만배에 달한다는 것이 일반적인 견해이다⁸⁾. 이런 극부적인 온도 상승 및 압력 상승은 연료인 가솔린의 경우 물에 비하여 증발성이 뛰어나므로 초음파 에너지가 연료의 분무특성에 영향을 미치게 될 것이다.

3. 실험 장치 및 실험 방법

3.1 연료 분사 장치

연료 분사 실험 장치는 Fig.2와 같이 연료 공급장치, 인젝터 구동 및 외부트리거 회로부, 초음파 에너지 부가 장치와 입경 측정장치로 구성되어 있다.

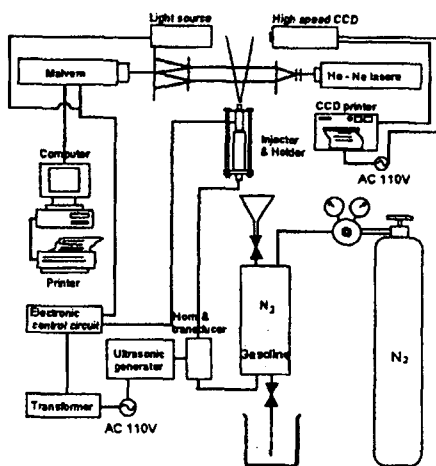


Fig. 2 Schematic diagram of experimental apparatus

초음파에너지 부가 장치는 28 kHz, 200W로 하였고, 연료의 압력 조절은 연료 펌프에 의해 작동될 경우 펌프에 의한 압력 변동 요소를 제거하기 위하여 질소 용기를 사용하여 압력을 일정하게 유지하였고 입경 측정장치는 Malvern 2600C를 사용하여 외부 트리거 방식으로 입경을 측정할 수 있게 하였다^{10,11)}. 외부 트리거는 전자 회로에

의해 제어되고 분무 시작으로부터 지연시간을 두게한 후 1msec 동안 신호를 발생시켰으며 입경측정장치를 외부트리거에 동조시켰다.

Fig.3은 연료분사신호 및 입경측정장치와 CCD 카메라를 이용한 분무 촬영시 빛의 제어를 위한 전자회로이며, 연료분사시간 및 간격을 임의로 조절 할 수 있고 지연시간을 조절 할 수 있도록 설계, 제작 하였다.

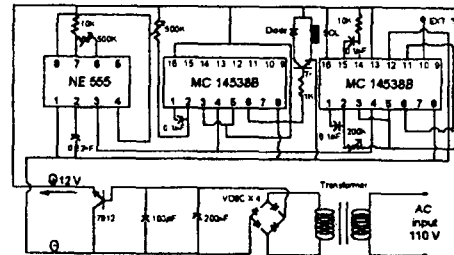


Fig. 3 Schematic diagram of electronic control circuit

3.2 질량 분포 실험 장치

질량 분포 실험 장치는 Fig.4와 같이 제작하였으며 19개의 포집관을 x 방향으로 설치하여 분사되는 연료의 양을 포집하고 y 방향으로 이동이 가능하게 하였다.

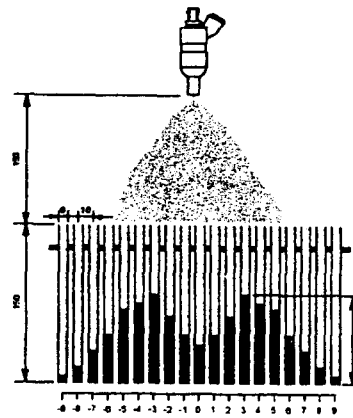


Fig. 4 Schematic diagram of patternater for measuring distribution

따라서 분사되는 연료의 단면을 이동하며 측정할 수 있게 하였다¹²⁾. 그리고 포집판의 재질은 가솔린에 변형되지 않는 투명 우레탄 튜브를 사용하였고 내경 5 mm, 외경 6 mm, 길이 150 mm의 관을 사용하였으며 관의 중심과 중심 사이의 거리는 10 mm로 하였다.

3.3 측정 위치 및 방법

연료 분사 방법은 간헐분사로서, 2.5msec 동안 분사하고 97.5msec 동안 연료분사를 정지하도록 하여 100msec을 주기로 반복 분사하였고, 입경측정은 매 분사 때마다 1msec 동안 측정하게 하고 2000 데이터까지 샘플링하도록 하였다. 그리고 이와 같은 측정을 20회 반복하여 평균한 값으로 평균입경을 표시하였다. 입경측정시 입경 분포함수는 Rosin-Rammler 분포함수를 이용하였다.

입경 측정 위치는 Fig.5에서 보는 바와 같이 연료의 분무 선단거리가 50 mm되는 지점에서 연료의 분사 압력을 2 kg/cm²~7 kg/cm²까지 각각 1 kg/cm² 간격으로 압력을 증가시키며 상용 분무와 초음파 에너지 부가 분무의 연료 평균 입경을 측정하였다. 연료 분사 압력 3 kg/cm²에서는 분무 선단이 도달하는 거리 별로 40 mm~80 mm까지 각각 10 mm 간격으로 입경을 측정하여 상대 비교 하였다.

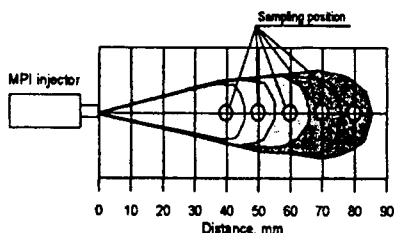


Fig. 5 Measuring position of drop size

분사 연료의 질량 분포 측정은 연료 분사 압력 3 kg/cm²에서 Fig. 4에서 보는 바와 같이 인젝터 선단으로 부터 150 mm 하단에 질량 분포 실험 장치를 설치하고 y 방향으로 이동하며 측정하였다.

그리고, 분무 집중도는 다음과 같은 수식에 의해 계산하고 이를 ϕ (ESA, equivalent spray angle)¹¹⁾라 한다.

$$\phi^- = \tan^{-1} \left[\left(-\frac{\sum z^- x^-}{\sum z^-} \right) / l \right] \quad (4)$$

$$\phi^+ = \tan^{-1} \left[\left(\frac{\sum z^+ x^+}{\sum z^+} \right) / l \right] \quad (5)$$

$$\phi(\text{ESA}) = \phi^- + \phi^+ \quad (6)$$

이때 l 은 인젝터 선단으로 부터의 거리이고 +는 중심포집판의 오른쪽을, -는 중심포집판의 왼쪽을 나타낸다.

이는 분무각을 화상에 의해 측정하는 것과는 달리 분무되는 연료량의 분포를 평균하여 정의하므로 대략 50%정도 작은 값을 나타내고, 분무가 확대칭일 경우는 포집판이 분무 중심을 통과하도록 설치하여 측정된 값을 식(4)-(5)를 이용하여 계산하고, 확대칭이 아닐 경우는 포집판을 회전시키며 측정하고 ϕ 를 평균하여 사용하면 집중도를 계산할 수 있다.

4. 결과 및 고찰

4.1 평균 입경

Fig.6은 초음파 에너지 부가의 경우와 상용의 경우에 노즐로 부터 분무선단이 50 mm에 도달할 때 분사 압력을 2~7 kg/cm²까지 각각 1 kg/cm²씩 증가시키면서 연료 평균 입경(SMD)을 측정된 결과이다.

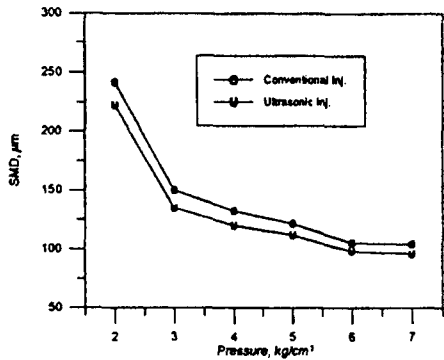


Fig. 6 Relation of SMD and injection pressure

두 경우 모두 전체적인 경향은 압력이 증가 할 수록 입경 감소가 적게 나타나는 일반적인 경향을 보이고 있다.

초음파 에너지 부가시 연료의 평균 입경은 약 14%의 입경감소가 나타났다. 그 원인은 초음파 에너지를 연료에 부가 함으로써 공동현상이 발생하여 식(2), (3)에서와 같이 연료가 활성화되어 연료의 미립화를 촉진시키기 때문이다^{10,11)}.

Fig.7 은 연료 분사 압력 3 kg/cm²에서 분무선단 도달거리 변화에 따른 평균 입경을 상대 비교한 것이다.

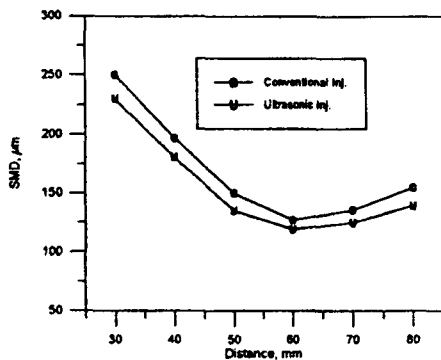


Fig. 7 Relation of SMD and axial distance

인젝터 선단으로부터 60 mm에서 입경이 최대로 감소 한후 더 먼거리로 갈수록 입경이 다시 증가 되어지는 일반적인 경향을

보이고 있다. 가솔린의 분무액적분열은 60mm 정도에서 끝나고, 60mm 이후에는 액적이 공기와 마찰로 인한 증발로 판통속도가 떨어지게 된다. 따라서 바로 뒤에 판통하는 큰액적과 충돌, 응집되는 결과로 연료의 입경이 증가된다고 사료된다.

초음파 에너지 부가의 경우가 분무거리 변화에 따른 평균 연료입경이 13%정도 작게 나타나고 있으며 그 원인은 Fig.6 에서 설명한 바와 같다.

4.2 질량 분포 및 분무각 측정

Fig.8 과 Fig.9 는 분사되어진 연료의 질량 분포를 측정한 것으로 x와 y는 포집판의 설치위치물, z(mm)는 포집판에 포집된 높이를 나타낸 것이다.

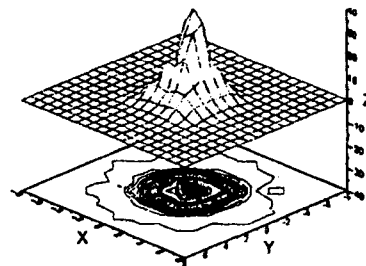


Fig. 8 Mass distribution of conventional injection (Injection pressure 3kg/cm²)

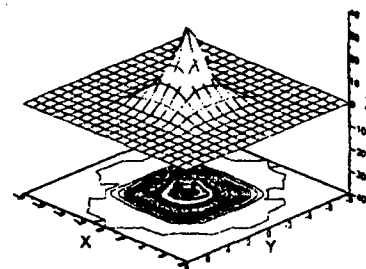


Fig. 9 Mass distribution of ultrasonic added injection (Injection pressure 3kg/cm²)

그 결과 초음파 에너지 부가의 경우가 상용의 경우에 비하여 넓은 질량분포를 가지고 있고, 중앙으로 집중되는 현상이 적게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 집중도 (ESA) 계산결과 상용의 경우는 12.4°, 초음파 에너지 부가의 경우는 14.0°로 나타났다. 그 원인은 Fig.6,7의 요인으로 초음파 에너지 부가의 경우가 상용의 경우에 비해 입경이 미세하고 관통속도가 떨어지기 때문이다.

Fig. 10 과 11 은 상용의 경우와 초음파 에너지 부가의 경우 CCD 카메라를 이용하여 분사 압력은 3 kg/cm² 일 때 작동 신호 초기로부터 지연시간을 주어 촬영한 결과이다. 지연시간 4.5msec 일 때 분무는 충분히 발달한 상태에 도달하였다. 이때를 기준으로 분무각을 측정한 결과 상용의 경우는 약 24°, 초음파 에너지 부가의 경우는 30°도로 나타났다. 분사 길이는 초음파 에너지 부가의 경우가 짧게 나타난다. 그 이유는 초음파 에너지 부가의 경우가 앞에서 언급한 Fig.6의 연유로 연료의 분무 입경이 작아지기 때문이다. 화상에 의한 분무각은 6° 정도 초음파 에너지 부가시 증가되어진다.

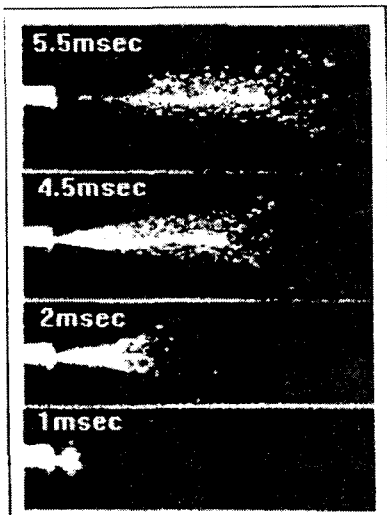


Fig. 10 Photographs of conventional injection(Injection pressure 3kg/cm²)

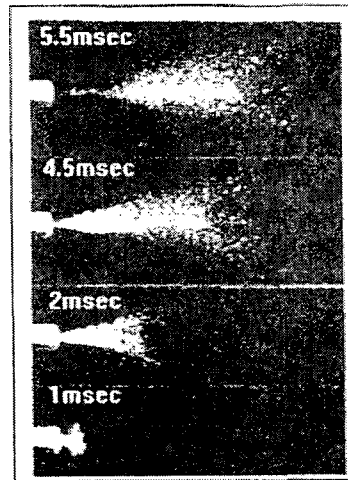


Fig. 11 Photographs of ultrasonic added injection(Injection pressure 3kg/cm²)

5. 결 론

본 연구는 연료에 초음파 에너지를 부가하여 분사한 경우와 상용의 경우에 분무 특성을 상대 비교하기 위하여 연료의 평균 입경, 질량의 분포 및 분무 사진 촬영의 기법을 이용하여 측정된 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 연료 분사 압력을 변화시키면서 입경을 측정된 결과 분사 압력이 증가함에 따라 입경이 작아지고, 초음파 에너지 부가의 경우가 분무 입경이 14% 감소되었다.
- 2) 분사압력 3 kg/cm²에서 분무 선단 도달 거리에 따른 연료의 입경을 측정된 결과 초음파 에너지 부가의 경우가 분무 입경이 13% 감소되었다.
- 3) 질량 분포 측정 결과 초음파 에너지를 부가한 경우가 연료 분포가 넓게 나타났으며, ESA를 계산한 결과 상용의 경우에 비해 2.6°의 증가를 보이고, 화상에 의한 분무각 측정결과 6°의 증가를 보였다.

참 고 문 헌

1. 류정인 외 2인, "가솔린 기관용 흡기관 내에서의 흡입연료 미립화에 관한 연구", 충남대학교 공업교육연구소 논문집 8(2), pp.65~72, 1985
2. K. Horie & K. Nishizawa, "Development of a high fuel economy and high performance four-valve lean burn engine", International Conference IMechE, London, C448/014, 1992
3. A. K. Oppenheim, "The future of combustion in engines", International Conference IMechE, London, C448/022, 1992
4. 전홍신, "TBI 분사밸브의 분무특성의 개선에 관한 연구" 한국 미립화 연구회지, pp.51~59, 1992
5. 류정인, "내연기관 기술자를 위한 액체의 미립화(I)", 한국자동차공학회지 11(4), pp.30~34, 1989
6. 류정인, "내연기관 기술자를 위한 액체의 미립화(II)", 한국자동차공학회지 11(5), pp.46~54, 1989
7. 千葉 近, "超音波 噴霧" 山海堂, pp.56~62, 1990
8. 島川正憲, "超音波工學" 工業助詞會, pp.20~21, 1975
9. B. E. Noltingk & E. A. Neppiras, "Cavitation produced by ultrasonics : theoretical conditions for the onset of cavitation", Proc. Phys. Soc., 64B 1032, 1951
10. 윤면근 & 류정인, "초음파 연료공급장치를 이용한 EFI 방식의 연료분무특성에 관한 연구", 자동차공학회지, Vol.16 No.6, pp.16~21, 1994
11. 윤면근 & 류정인, "연료 직접분사식 초음파 연료무화장치개발", 제 2 회 G7 차세대자동차기술 Workshop, pp.224~227, 1994
12. L. Bayvel & Z. Orzechowski, "Luquid Atomization", Taylor & Francis, pp.402~403, 1993