

디젤 機關의 完全燃焼用 霧化器의 開發

A Study on the Development of Atomizer of the Complete Combustion for Diesel Engines

조 규 상*, 류 정 인**
G. S. Cho, J. I. Ryu

ABSTRACT

This is an experimental study to investigate the characteristics of Diesel spray and Diesel engine performance using ultrasonic injection nozzle (A, B type) and conventional commercial injection nozzle (C type).

The results are obtained as follows:

1. SMD and range of size distribution of Diesel spray using the ultrasonic nozzle are smaller than those using the conventional injection nozzle, and spray angle is spread.
2. Because of the difference of the ultrasonic vibration energy transfer in the same condition, the effects of A-type ultrasonic vibration are larger than those of B-type ultrasonic vibration.
3. Attaching the ultrasonic vibrator to the conventional injection nozzle of the Diesel engine, engine performances i.e. BMEP, BSFC, and cylinder peak pressure are improved.

1. 序 論

디젤機關의 노즐에서 噴射된 연료는 高溫 高壓의 燃焼場에서 곧바로 燃焼하지 않고, 着火遲延기간을 거친후 급격연소, 제어연소 및 후기연소과정을 지나 燃焼를 완료하게 된다. 着火遲延은 噴射된 연료가 分裂, 微粒化되어 氣化, 蒸發, 高溫空氣와 混合擴散하는 物理的 着火遲延기간과, 燃料蒸氣의 熱分解 과정에서 발생하는 低級炭化水素와 酸素가 반응해서 전 파가능한 火焰核을 형성하는 化學的 着火遲延기간으로 나눌 수 있다.¹⁾

物理的 着火遲延기간은 化學的 着火遲延기간의 약 2 배나 되며, 계속되는 燃焼과정에서 機關出力, 노킹, 燃焼騒音, 排氣가스 組成 등에 영향을 미치므로, 디젤噴霧特性에 관한 研究가 활발히 進行되고 있다.²⁾

디젤噴霧特性은 노즐로부터 분출된 燃料粒子的 分散 (Dispersion), 霧化 (Atomization), 貫通力 (Penetration)으로 나누어 생각할 수 있는데, 粒子分散의 경우 연소실내 전역에서 燃料과 空氣의 混合比率이 균일해야 하나 실제 디젤기관의 燃料粒子가 도달되지 못하는 부분에서는 연소용 空氣가 거의 이용되지 못

* 正會員, 忠南大學校 大學院 機械工學科

** 正會員, 忠南大學校 工科大學 機械工學科

하고, 반대로 연료粒子가 밀집된 부분에서는 공기가 부족하여 不完全燃焼 되기가 쉽다.

또 燃料粒子의 크기가 작을수록 空氣와의 混合, 蒸發이 활발해져 燃焼反應이 신속하게 이루어지므로 가능한한 미세한 粒子를 만들 必要가 있다.²⁾ 그러나 과도하게 霧化시킬 경우, 유동하는 연료입자의 質量이 작아져 高溫高壓의 공기중을 관통할 貫通力이 작아져 噴霧先端到達距離는 짧게 되며, 충전된 공기의 利用率은 저하한다.²⁾ 이와같이 燃料의 霧化와 분무선단 도달거리가 연소에 미치는 영향은 서로 상반되기 때문에 最適의 燃焼條件을 설정하기 위한 충분한 實驗과 理論이 디젤연료 분사장치 의 設計에 뒷받침되어야 한다.

이러한 디젤 噴霧特性을 개선하려는 여러 연구중 燃料噴射系統에 超音波振動을 가하면 분무平均입경이 작아지며, 분무각이 증대하여 고른 입경분포를 나타내는 것으로 보고되었으나, 입경이 작아져 運動量 저하로 噴霧先端到達距離가 짧아질 것으로 예상된다. 그러나, 燃料粒子가 작아져 物理的 着火遲延기간의 減縮, 공기와와의 混合등에 의한 燃焼改善의 가능한 분무각 增大로 공기이용율이 向上되어 機關出力의 向上, 燃焼騒音의 低下, 排氣有害物의 低減을 기대할 수 있으리라 생각된다.

따라서 본 研究에서는 기존 디젤 분사노즐에 超音波回路를 삽입하여 超音波振動을 가했을 때, 분무平均입경, 입경분포, 분무각등의 微粒化 特性을 연구하였으며, 이를 基礎로 하여 구동중인 機關의 노즐에 超音波振動을 가했을 때 機關의 性能特性을 기존 노즐의 경우와 비교하여 研究하였다.

2. 超音波 噴霧實驗

氣化器에서 噴出되는 燃料에 超音波 에너지를 가하면 작은 입경의 액적을 얻을 수 있다는 것은 잘 알려져 있으나^{3,4,5)}, 디젤 噴霧에 대한 연구는 그다지 많지 않다.^{6,7)} 超音波噴霧實驗은 두 형태 즉, 大氣중에서 燃料을 噴射하는 경우와 壓力容器속에서 燃料을 噴射하

는 경우의 디젤 噴霧特性을 알아보았다.

2.1 實驗裝置

Fig.1은 既存 상용노즐과 超音波振動子가 부착된 초음파노즐에서 분사된 燃料의 분무特性을 조사하기 위한 實驗裝置의 概略圖이다. 연료탱크로부터 나온 연료는 AC Motor로 구동되는 분사펌프에 의해 노즐로 압송된다. 이 노즐은 Pintle 형으로 분공경이 1.0mm이며 超音波 振動子 및 Horn이 장착될 수 있도록 하였다. 투명 아크릴로 제작된 壓力容器(150×150×300mm, 1atg)는 壓縮機로 가압되며 용기내의 압력은 높은 압력인 경우 기밀유지가 곤란하여 1kg/cm²으로 하였다. 분사시 액적채취를 위한 Slide glass와 셔터 구동, Solenoid 스위치, Video寫眞撮影을 위한 光原 및 카메라, 超音波回路 및 發生裝置 그리고 Oscilloscope 등으로 構成되어 있다. Fig. 2는 超音波 발진회로에 의해 구동되는 진동자와 Horn을 노즐에 부착한 狀態

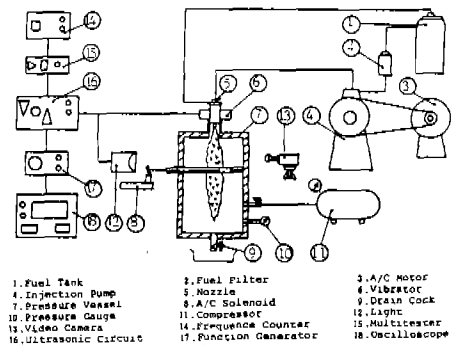


Fig.1 Schematic Diagram of Diesel Spray Experimental Apparatus

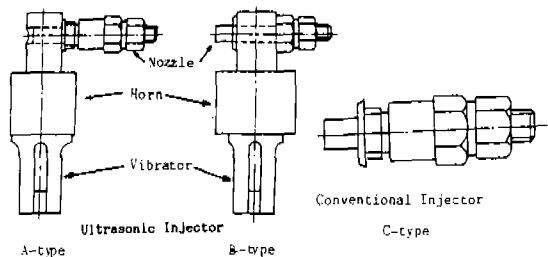


Fig.2 Injection Nozzle and Vibrator Assembly

를 나타낸 것으로, 분사되는 燃料의 最末단에서 초음파 진동을 가할 수 있도록 A-type 은 노즐 Tip 부분에 超音波 振動子の Horn 을 부착하였으며, B-type 은 실제기관의 구조를 크게 변경하지 않고 설치가능한 것으로 노즐 Holder 부분을 진동할 수 있도록 Horn 을 부착하였고, C-type 은 기존 상용노즐을 그대로 사용했다.

2.1.1 超音波 發振回路 및 振動子

超音波 振動子は 비교적 용이하게 구입할 수 있고, 工業用으로 많이 사용되는 28kHz 磁歪形 Ferrite Magneto Strictive 를 택하였다. 이 振動子를 구동하기 위해 Derlington 超音波 발진회로를 사용하였으며⁶⁾, 出力端 最大出力은 150 W, 電流는 3 A 이하이며, 波形은 Oscilloscope 로 확인하였다. 또한 일반적으로 振動子와 피진동물체 사이에 振動을 확대하거나, 速度變換을 위해 Concentrator인 Horn 을 사용하는데, 본 實驗에서는 振幅擴

大率이 크고 양단 斷面積比率이 4:1 인 Al-A2024BES 材質의 Step 형 Horn 을 가공 부착하였다. 28kHz 振動子와 A, B-type Horn 의 規格 및 諸元을 Fig. 3 과 Table 1 에 나타낸다.

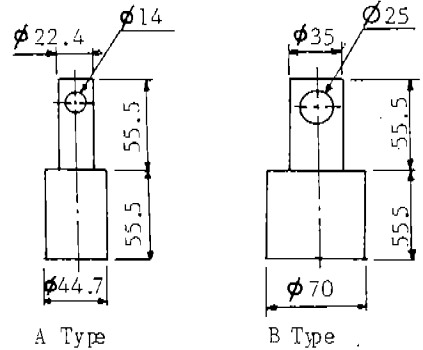


Fig. 3 Schematic Diagram of 28 kHz Vibrator Horn

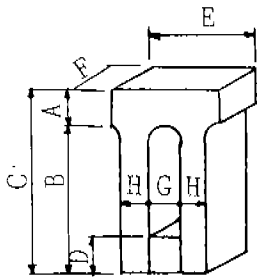


Table 1 28 kHz Vibrator Specification

Frequency	A	B	C	D	E	F	G	H	Weight (g)	Max. Amplitude (μm)	Stress (kN/m^2)
28kHz	14	74	88	18	40	20	11	9	240	5	150

2.1.2 噴霧粒子 포집 및 寫眞撮影

超音波노즐 및 상용노즐로부터 분사된 噴霧粒子的 크기, 分布는 液浸法 (Immersion Liquid Method) 에 의해 測定하였고, 포집액으로는 Silicon oil (1000 cSt, 20°C) 를 사용하였으며, 燃料인 경유는 쉽게 蒸發 溶解되기 때문에 物性이 비슷한 油壓作動油인 Tellus oil (10cSt, 40°C) 를 사용하여, 포집경이 5.5 mm 이고, 셔터가 달린 포집장치에 의해 포집하였다.⁶⁾ 분무류의 噴霧形狀, 噴霧角 등은 순간 사진촬영 및 Video 연속사진촬영을 하여 觀察, 測定하였다. 壓力場내 噴霧寫眞撮影은 Fig. 4 의 (a)에서 처럼 카메라는 光線과 서로 직각으로 설치하여 光이 噴霧에 照射된 후

액적 表面에서 反射되는 反射光에 의한 사진 촬영법을 택하였다. 그리고 大氣壓狀態에서 의 분무사진촬영은 Fig. 4 의 (b)에서 처럼 光을 噴霧의 側方에서 照射하고 噴霧의 뒤에 Black screen을 設置하여 선명하게 촬영되도록 하였다.

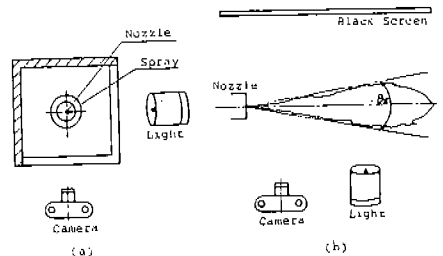
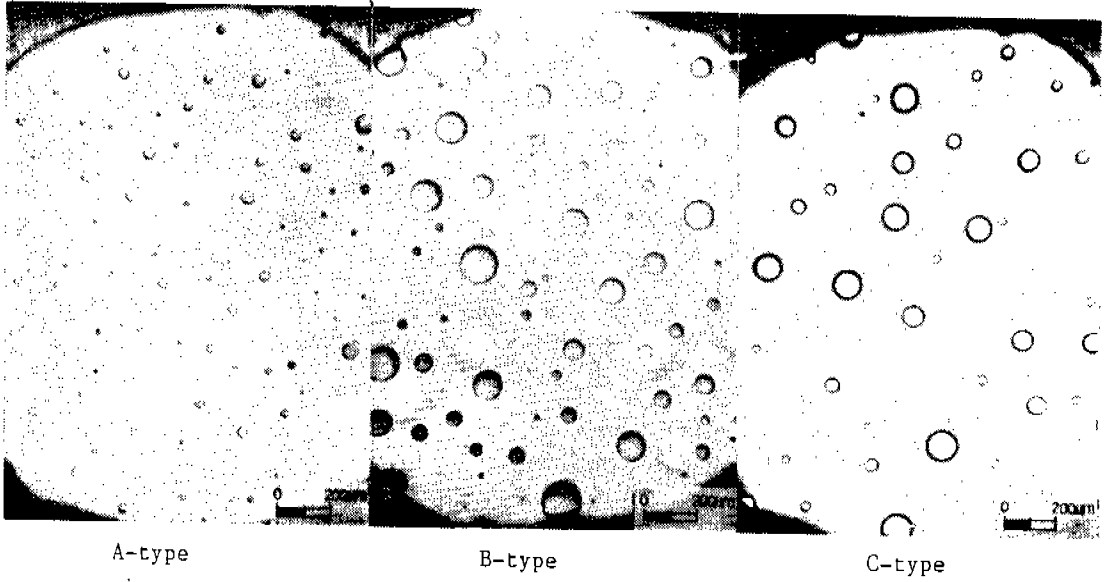
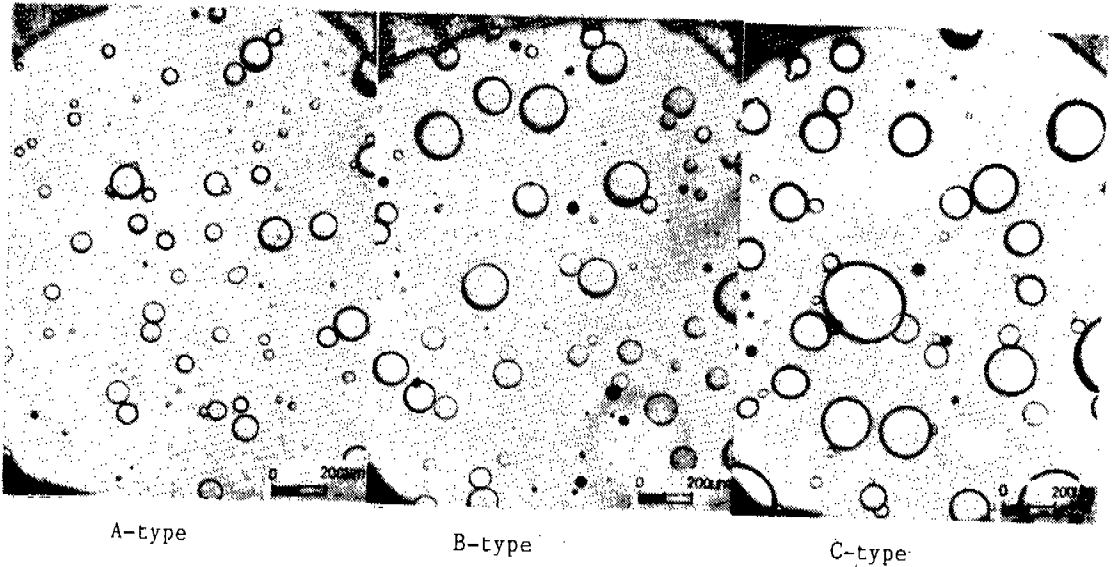


Fig. 4 Schematic Diagram for Photography



Injection Pressure : 130kg/cm^2 , Catcher Position : 120mm



Injection Pressure : 50kg/cm^2 , Catcher Position : 120mm

Fig. 5 Photograph of Droplets of Diesel Spray

2.2 超音波 噴霧實驗 結果

2.2.1 噴霧 平均粒徑

超音波 振動子에 의해 振動을 가하면서 노즐의 噴射壓力을 40, 50, 90, 130 kg/cm²로 변화시켜 분사하였을 때, 노즐 팁으로부터 大氣壓 狀態에서는 70, 120, 300, 500mm 위치에서 그리고, 壓力용기(분위기 압력, 1atg)내 분사시는 용기크기의 제한으로 70, 120mm 위치에서 噴霧粒徑을 채취 150배 배율의 顯微鏡으로 사진촬영을 하였다. 그 결과를 Fig.5에 나타냈고 분무사진에 의해 다음식으로 噴霧平均粒徑(SMD, D₃₂)을 구했다.⁸⁾

$$D_{32} = \frac{\sum (d_i^3 \cdot n_i)}{\sum (d_i^2 \cdot n_i)}$$

Fig. 6은 大氣壓 狀態에서 분사노즐 tip으로부터 300mm 지점에서 채취한 분무의 噴射壓에 따른 平均粒徑을 SMD(Sauter Mean Diameter)로 나타낸 것이다. 噴射壓力이 커질수록 SMD가 점점 작아지는 傾向은 A, B, C type 노즐 모두같고 노즐 tip 부분에 超音波 振動을 가한 A-type 노즐이, 노즐 Holder 부분을 진동하는 B-type의 경우보다 SMD가 작음을 알 수 있다. 또 B-type이 상용노즐보다 SMD가 작아, 超音波 振動을 가할수록 디젤분무는 미세하게 微粒化됨을 알 수 있다.

Fig. 7은 噴射壓力 130 kg/cm²의 경우 액적 채취 위치에 따른 SMD를 나타낸 것이다. 액적채취위치가 노즐 Tip 으로부터 가까울수록 SMD가 커지며 300mm 이상이면 큰 차이가 없음을 알 수 있다. 이것도 超音波 노즐 A-type 의 SMD가 가장 작고 상용노즐 C-type 이 큼을 알 수 있다.

Fig. 8은 壓力場內 霧圈氣 壓力을 1 kg/cm²로 높이고 압력실 크기의 제한으로 노즐 Tip 으로부터 70, 120mm 두 곳에서 噴霧粒子를 포집 測定한 結果를 나타낸 그림이다. 噴射壓力이 클수록 粒徑이 작아지며 노즐 Tip 으로부터 70mm 떨어진 곳에서 보다 120mm 떨어진 곳에서 相對的으로 噴霧가 충분히 발달

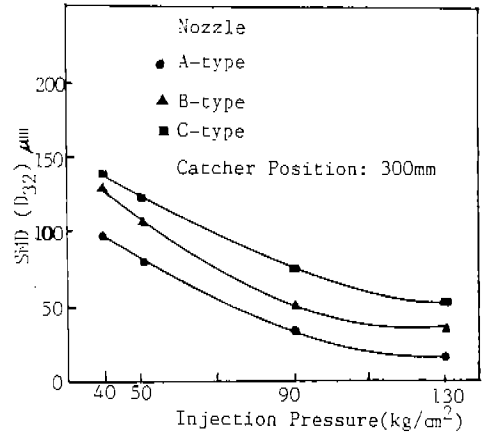


Fig. 6 Effect of Injection Pressure on SMD

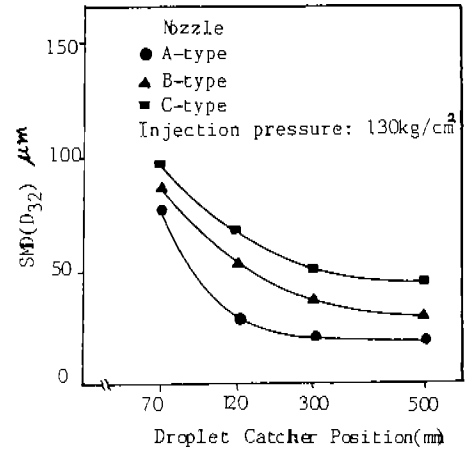


Fig. 7 Effect of Droplet Catcher Position on SMD

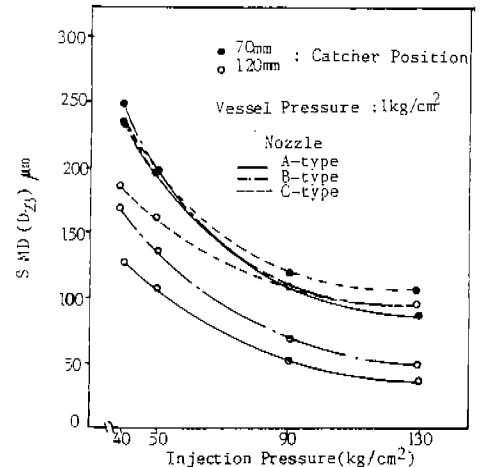


Fig. 8 Effect of Injection Pressure on SMD in the Pressure Vessel

되기 때문에 SMD가 작아지는 경향은 같다. 大氣壓 狀態에서보다 압력장내의 平均粒徑이 큰 것은 노즐 開弁壓은 噴射壓力와 霧團氣 壓力과의 차이에 의해 決定되는데, 壓力差가 큰 대기압에서 噴出速度가 커지고 亂流를 더 강하게 일으켜 微粒化를 촉진시키기 때문이라고 생각된다. 또한 燃料가 噴出되는 노즐 Tip 부분에 超音波 振動을 가한 경우가 노즐 Holder 부분을 진동시키는 것보다 微粒化 狀態가 우수한 것은, 超音波 振動 에너지 전달이 Holder 쪽 보다 Tip 부분이 더 效果的이기 때문이라고 생각된다.

2.2.2 粒徑分布

Fig. 9는 粒徑寫眞을 근거로 하여 全體 粒子數에 대한 개개입자의 粒徑分布를 百分率로 나타낸 입경분포도의 한 예이다. 噴射壓力 130kg/cm²의 경우 상용노즐인 C-type은 1~280 μm에 걸쳐서 넓게 분포하며 大部分 40~120 μm 범위에 모여 있다. 超音波 노즐

인 A-type은 100 μm이내에 分布하며, 10~40 μm에 모여있고, B-type은 150 μm이내에 分布하며, 大部分 10~100 μm에 密集되어 있다. B-type은 C-type과 거의 비슷한 分布를 하고 있으나, B-type은 10~30 μm가 전체의 23.2%이고, C-type은 80~90

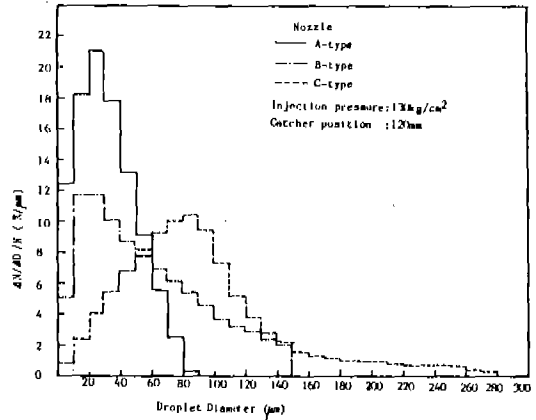


Fig. 9 Size Distribution of Droplets

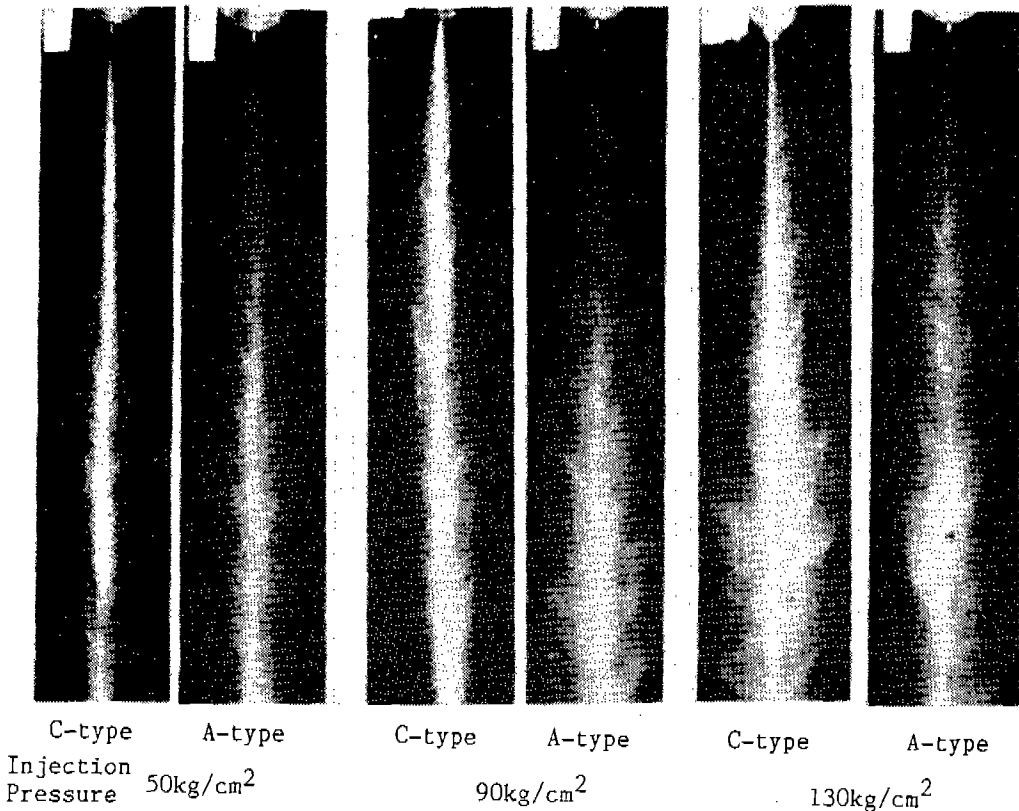


Fig. 10 Photograph of Diesel Spray

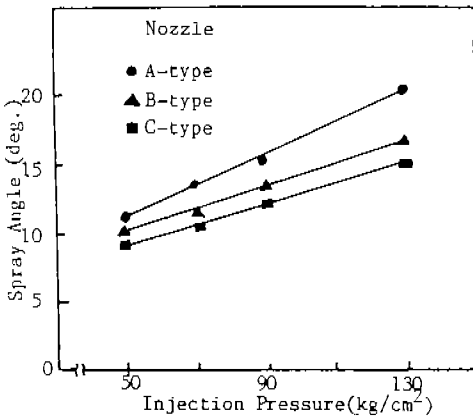


Fig.11 Effect of Injection Pressure on Spray Angle

μm가 전체의 14%를 차지한다. 초음파 振動子を 부착한 A, B-type의 경우, 초음파 에너지에 의해 噴霧의 霧化가 촉진되어 더욱 미세한 粒徑分佈를 하고 있다고 생각된다.

2.2.3 噴霧角

디젤분부의 주위공기와의 混合狀態는 噴霧 燃燒에서 중요한 特性의 하나로 이를 噴霧角으로 나타낼 수 있다. 噴霧角은 사진촬영에 의해 測定하였으며 이를 Fig.10에 나타냈다. 분무각은 Fig.4의 (b)와 같이 노즐 出口로부터 噴霧流에 外接線을 그어 그 접선이 이루는 각을 분무각 θ_s로 정의한다.^{2,11)} 초음파 노즐은 기존 상용노즐에 비하여 주위공기와의 混合이 더욱 촉진되어 噴霧角이 약간 增大되고 있음을 알 수 있다.

Fig. 11은 사진을 근거로 噴霧壓力에 대한 噴霧角을 나타낸 것으로, 기존 상용노즐보다 초음파노즐이, B-type 보다 A-type 노즐의 분무각이 약간씩 큼을 알 수 있다. 噴射壓力 130kg/cm²의 경우 C-type 노즐에 비해 A-type 노즐은 약 5.5°, B-type은 2°가량 噴霧角이 增大되었다.

3. 機關性能實驗

초음파 振動子を 부착한 노즐의 噴霧實驗을 통하여 초음파 振動子の Horn을 노즐 Holder 부분에 부착하는 것보다 노즐 Tip

부분에 부착하는 것이 더 미세한 噴霧粒徑을 얻을 수 있으며 噴霧角도 약간 커졌다. 그러나 실제 機關의 경우 A-type은 기관의 構造를 크게 變更·改善하여야 하고, 壓力과 水密이 문제가 되어, 構造上 부착이 가능한 B-type을 택하여 機關性能實驗을 하였다.

3.1 實驗裝置

實驗에 사용한 디젤 機關은 豫燃燒室式 4사이클 單氣筒 機關으로 제원을 Table 2에, 實驗裝置 개략도를 Fig. 12에 나타냈다. 實驗裝置는 超音波 振動을 가하기 위한 壓力 Transducer, Rotary Encoder 및 Oscilloscope, 機關出力 및 回轉數 測定을 위한 電氣動力計, 燃料消費量 測定을 위한 燃料 및 空氣 流量計 그리고 Timer 등으로 이루어졌다.

Table 2 Specification of Experimental Engine

Item	Contents
Type	4 Cycle, 1 Cylinder
Type of Combustion	Water cooled, Diesel Engine Pre-Combustion Chamber
Compression Ratio	21
Stroke Volume (ℓ)	0.675
Bore × Stroke (mm)	95 × 95
Max. Output (PS/rpm)	13 / 2400
Continuous Rating Output (PS/rpm)	10 / 2200

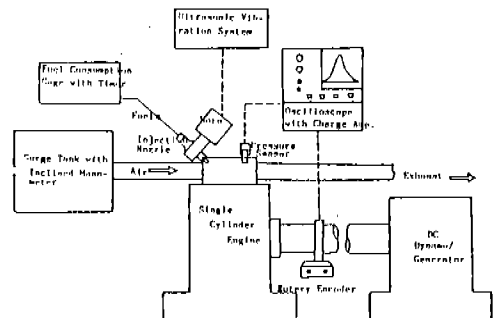


Fig.12 Schematic Diagram of Experimental Apparatus for Engine Performance Test

3.1.1 超音波 振動裝置

超音波噴霧實驗에서 사용한 振動裝置는 Derlington 초음파회로에 의해 발전되며 최대 150 W의 出力을 낼 수 있도록 하였고, 超音波裝置에 振動擴大率이 큰 Step 형 Horn을 기존 상용노즐의 Holder 부분에 장착하였다.

3.1.2 실린더내 壓力測定

실린더 내의 壓力을 測定하기 위해 실린더 헤드에 Fig. 13과 같이 Adapter를 Water jacket을 貫通하여 열박음함으로써 누수되지 않도록 하여 부착하였으며 그 위에 壓力 Transducer를 연결하였다. Adapter 구멍의 體積(약 0.46cm³)으로 인한 燃燒室體積의 변화(1.4%)의 영향은⁹⁾ 무시하였다.

또한 압력채취경의 변화에 따라 壓力의 氣柱振動이 발생하여 誤差의 原因이 되며^{9,10)}, 특히 膨脹行程에서 壓力파형이 진동하는 경우도 있으나, 본 實驗에서는 그 영향이 거의 나타나지 않아 이것도 무시하였다. 실린더내 壓力은 壓力變換器에서 Charge Amp.를 거쳐

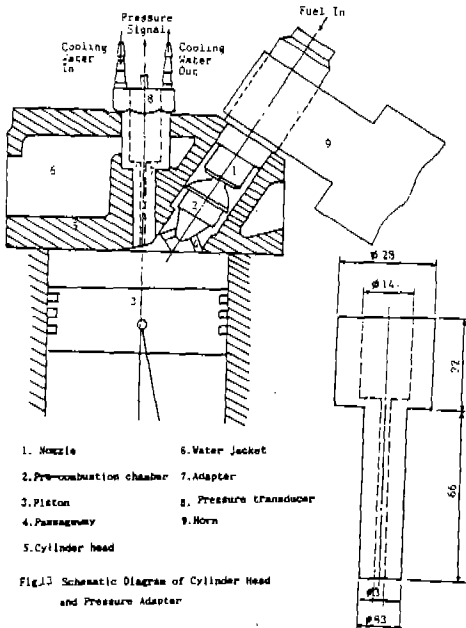


Fig.13 Schematic Diagram of Cylinder Head and Pressure Adapter

Oscilloscope로 들어가며 TDC와 크랭크각은 Rotary Encoder에 의해 크랭크각도 10도마다 Signal이 나타나며, 一定負荷 一定回轉數에서 Oscilloscope의 波形을 사진촬영함으로써 測定, 出力計算에 사용하였고, 동시에 動力計로 측정한 값과 比較하였다.

3.2 機關性能 實驗結果

燃料 Pump는 Bosch형을 사용하여 燃料噴射壓力은 120 kg/cm²으로 일정하게 유지시키고, 超音波노즐 및 기존 상용노즐을 사용, 기관 회轉수를 1500rpm까지 변화시켰으며, 이때 動力計의 吸收動力의 制限(最大 4kW)으로 機關의 負荷를 1/10, 2/10, 3/10만으로 性能因子를 測定하였다.

3.2.1 指壓線圖

Fig.14는 실린더내의 壓力信號와 크랭크각도신호를 Oscilloscope 사진촬영에 의해 나타난 것으로 機關回轉數 1100rpm, 負荷 1/10의 경우 기존 상용노즐 및 초음파노즐을 사용하여 實驗한 것이다. 초음파 노즐을 사용한 경우가 기존 상용노즐의 경우보다 실린더 最高壓力이 약간씩 증가하며, 爆發 膨脹行程中の 실린더내 壓力이 增加하였다. 이는 超音波振動에 의해 연료의 平均粒徑이 작아져 着火性이 향상되고 燃燒速度도 빨라지는 등의 燃燒 개선이 이루어지기 때문이라고 추측된다.⁵⁾

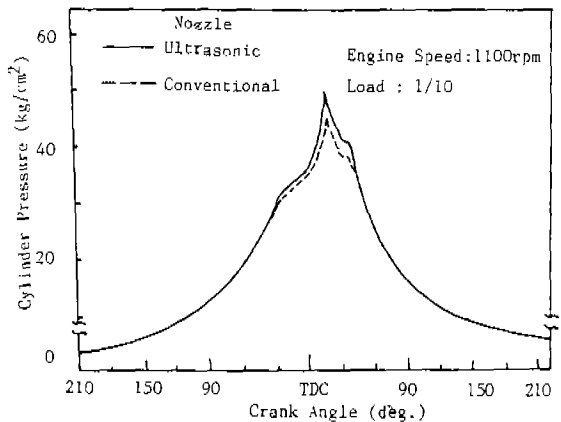


Fig.14 Indicator Diagram of Diesel Engine using Conventional and Ultrasonic Injection Nozzle

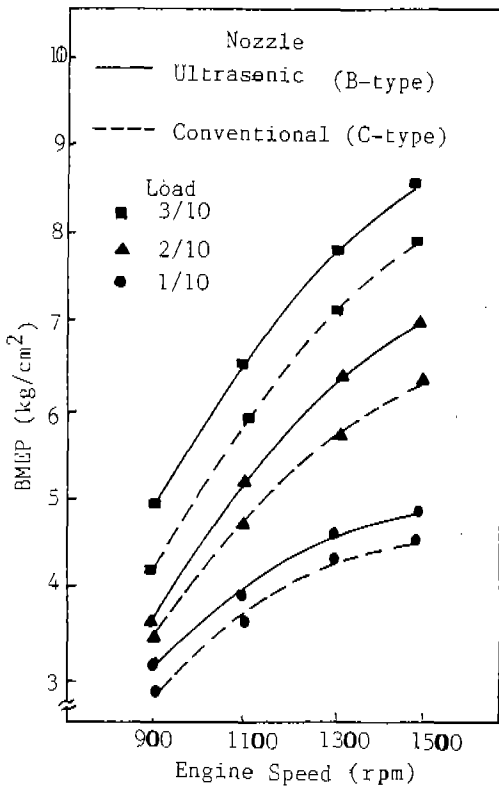


Fig. 15 Relationship between Engine Speed and BMEP

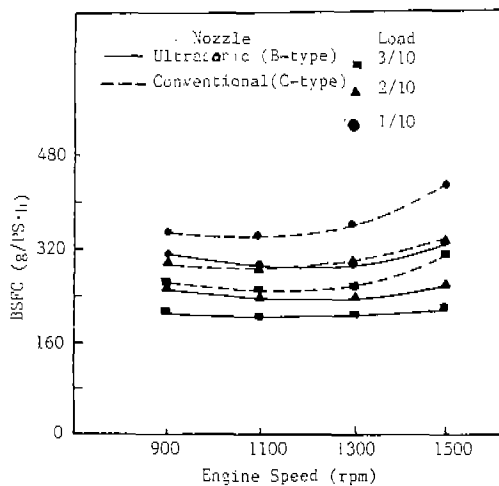


Fig. 16 Relationship between Speed and BSFC

3.2.2 制動平均有效壓력과 燃料消費率

충분한 霧化 作用은 均一한 混合氣의 形成과 完全燃焼를 목표로 한 燃焼改善을 이룰 수 있기 때문에 가솔린 機關에서 性能을 向上시킨다는 것은 일반적인 事實로 받아 들여진다.⁵⁾

디젤기관에서도 超音波 振動에 의한 充分한 霧化 作用은 입경의 微細化, 噴霧角의 增大 등으로 性能向上을 가져왔다. 그러나 상대적으로 큰 입경의 입자가 줄어들어 慣性力의 감소로 인한 주위공기 이용이 충분치 못하리라고 예상이 되나, 豫燃燒室式 機關이며, B-type 노즐은 미세한 입자와 입경이 큰 粒子가 混在되어 있기 때문에, 그 影響은 크지 않으리라고 생각된다.

機關出力 性能因子로서 制動平均有效壓력의 변화를 Fig. 15에 나타냈다. 動力計의 最大吸收馬力의 制限으로 3/10 負荷까지만 나타냈다. 그림에서 초음파 노즐을 사용한 경우가 기존 상용노즐보다 약 9% 制動平均有效壓력의 向上을 가져왔다. 이는 가솔린기관에서와 마찬가지로 분사연료의 充分한 霧化作用은 주위공기와 的 混入으로 氣化, 蒸發의 促進, 燃焼改善 등에 의해 制動平均有效壓力이 증가되었기 때문이라고 생각된다.

Fig. 16은 초음파 노즐을 사용한 경우와 기존 상용노즐을 사용한 경우, 燃料消費率을 나타낸 그림이다. 초음파 노즐을 사용한 경우가 制動燃料 消費率도 약간 저계 나타냈다. 이는 燃焼改善으로 인한 制動平均有效壓력의 증가로, 制動燃料消費率도 줄어들었다고 생각된다.

4. 結 論

본 研究는 디젤기관의 性能向上을 위한 한 方法으로서 기존 상용노즐에 超音波振動을 가해 유입하는 燃料를 霧化시켰을 때 디젤분무의 霧化特性을 考察하였으며, 이를 이용하여 실제 作動중인 디젤기관에 裝着, 實驗한 結果는 다음과 같다.

1) 超音波振動을 가한 경우가 기존 상용노즐의 경우보다 噴霧平均粒徑이 작아지며, 粒徑分布範圍도 줄어들며 噴霧角은 擴大되었다.

2) 超音波振動은 噴射壓力이 클수록, 그리고 노즐 Holder 부분보다 노즐 Tip 부분에 가하면 그 效果는 더 크다.

3) 超音波振動을 가하면서 機關을 運轉한 경우 기존 상용노즐의 경우보다 연소과정에서의 실린더내 壓力이 약간씩 증가했다.

4) 超音波振動을 가함으로써 충분한 霧化作用으로 燃燒改善을 가져와 平均有効壓力의 증대, 制動燃料消費率의 減少를 가져왔다.

後 記

本 研究는 韓國學術振興財團의 1989年度 學術研究造成費 支援에 의해 이루어진 研究結果로서, 同 財團의 研究支援에 대하여 感謝드립니다.

參 考 文 獻

1. 정진도 외 2인, “충격파관을 이용한 분무연료의 착화지연에 관한 연구”, 한국자동차공학회지 11권 6호, pp. 48-56, 1989.
2. 廣安博之外1人, “ディーゼル噴霧の到達距離と噴霧角” 日本自動車技術會誌 No.21, 1980.
3. 千葉近, “氣化器による微粒化特性”, 內燃機關 Vol.12, No.141, pp.11-19, 1973.
4. 千葉近, “超音波による液體微粒化の研究”,

日本機械學會論集 B編 51 卷 471 號, pp. 3589-3598, 1985.

5. Kazuyoshi Namiyama, “Development of Ultrasonic Atomizer and Its Application to S. I. Engine”, SAE paper No. 890430, 1989.
6. 남승덕, “초음파인젝터를 이용한 디젤분무특성에 관한 연구”, 충남대학교 대학원 석사학위논문, 1989. 2.
7. 전승석, 류정인, “초음파인젝터를 이용한 디젤기관 연소특성에 관한 연구”, 한국자동차공학회 추계 학술대회 초록집 pp. 34-39, 1989. 11.
8. 倉林俊雄, “內燃機關技術者のための液體微粒化”, 內燃機關 15 卷 183 號, p. 57, 1976.
9. 長尾, 池上, “壓力取出し管によるインシケータの誤差”, 日本機械學會論文集 第2部, 30 卷 213 號, pp. 645-654, 1964.
10. 김희년 외 2인, “Micro-Computer를 이용한 기관 실린더의 압력측정 및 연소해석에 관한 연구”, 한국자동차공학회지 10권 3호, pp. 45-50, 1988.
11. Nobuyuki Yamajaki, “The Effect of Flash Boiling Fuel Injection on Spray Characteristics”, SAE paper No. 850071, 1985.