

디젤엔진 연소공기 습식여과기의 개발에 관한 연구

김용석*, 박성호**, 양순용***

(논문접수일 2007. 3. 8, 심사완료일 2007. 11. 12)

A Study on Development of the Wet Type Filter for Combustion Air of Diesel Engine

Yong-Seok Kim*, Sung-Ho Park**, Soon-Young Yang***

Abstract

In this paper, the performance of wet type filter for diesel engine combustion air has been studied with effects of air temperature, humidity, and pressure. After experiments are performed without diesel engine, it has been investigated the applicability to diesel engine. Wet type filter for diesel engine combustion air had advantages that it is not necessary to change air filter and that engine exhaust gas is environmentally friendly due to low NOx and particulate emission. Also, the filtration performance has been carried out with smoke shell.

Key Words : Wet Type Filter(습식 여과기), Vehicle Air Cleaner(수송기용 공기여과기), Combustion Air(연소 공기), Air Filtration(공기 여과), Diesel engine(디젤엔진)

1. 서론

내연기관은 외부의 공기를 흡입하여 실린더 내에서 연료를 연소시켜 동력을 발생시키는 장치이다. 이러한 내연기관은 연료를 연소시키기 위해서는 반드시 공기가 필요하고 유입되는 공기들은 깨끗하게 여과되어야 한다. 현재 내연기관에 사용되는 공기여과 방식은 주로 여과지를 이용한 건식이 사용되고 있으며 디젤엔진의 경우는 건식과 습윤식이 혼용되고 있다. 벌집형 다공질과 점성이 있는 오일을 이용한 습

윤식 필터는 1차적으로 다공매체가 큰 입자를 여과하고 2차적으로 미세먼지를 흡착하여 여과한다⁽²⁾.

이와 같은 방식의 습윤식여과기는 잦은 세척이 필요하며 이에 따른 그 사용이 활성화되지 못하고 있다.

특히 열악한 환경에서 작업하는 건설 기계나 군사용 장비의 경우, 작업 중 발생한 부유물들이 대량으로 유입되어 필터의 수명은 더욱 짧다. 이로 인한 잦은 필터 교체는 작업효율을 저하와 많은 교체비용 낭비로 이어지고 있다. 또한 여과기의 막힘은 연소공기의 부족을 야기하고 이로 인한 연료과

* 울산대학교 대학원 기계자동차공학부

++ 경일대학교 기계자동차학부

+++ 교신저자, 울산대학교 기계자동차공학부 (soonyy@mail.ulsan.ac.kr)

주소: 680-749 울산광역시 남구 무거2동 산29

농(fuel-rich) 연소상태로 되어 불완전 연소로 이어지며, 순간적인 엔진의 출력저하뿐만 아니라 매연발생의 원인이 되어 대기오염을 가중시키는 원인이 되고 있다⁽³⁾.

더욱이 한번 사용된 여과기는 재사용이 불가능하여 폐기하여야 하며, 이러한 필터의 폐기는 2차 환경오염의 원인이 되고 있다. 배기가스 저감 측면과 자원 재활용 측면을 고려한 일회성 종이여과기를 대체할 수 있는 반영구적인 새로운 형식의 여과기 개발이 필요하다.

물을 이용한 공기 여과방식은 흡입된 공기를 물에 접촉시켜 공기 중의 부유물질을 물속에 침전시키는 방식이다.

공기 중의 부유물은 부피에 비하여 질량이 가벼운 물질이며 먼지와 같은 입자성 물질이 물의 표면에 접촉하게 되면 물의 표면장력에 의하여 물속으로 빨려들어 가게 된다. 물속에 흡입된 부유물은 물질고유의 부피로 인하여 물보다 무거운 물질로 변하게 되고 그로 인해 자연 침전이 이루어지게 된다. 물속에 갇힌 미세한 물질은 물의 표면장력을 깨고 밖으로 나올 수 있는 에너지를 얻기 전에는 물표면 밖으로 나올 수 없으며, 밖으로 나온다 하더라도 함유된 수분이 완전 건조되기 전에는 공기 중으로 부양할 수 없는 상태가 된다.

이와 같이 물을 이용한 공기정화기술은 가정용 공기청정기 기술이나 산업용 공기청정기⁽⁴⁾뿐만 아니라 자동차용 연소공기 청정기⁽⁵⁾ 분야⁽⁵⁾에의 적용에 대한 관심이 높아지고 있다. 특히출원 경향을 살펴보다도 근래에 늘고 있음을 볼 수 있으며, 이러한 추세는 물을 이용함으로써 디젤엔진의 경우 연소공기로서 많은 장점을 가지기 때문인 것으로 판단된다.

디젤기관은 가솔린기관에 비해 열효율과 출력이 높아 사용빈도가 점점 많아지고 있으며 소형자동차에 까지 확대적용 되어가고 있는 추세다. 이에 따른 대기환경 오염문제는 더욱 가중되고 있으며 이러한 문제를 해결하기 위한 수단으로 수분효과를 이용한 기술이 오래전부터 많은 연구가 되고 있다. 배기가스 개선을 위한 기술로는 수분을 포함한 공기의 흡입, 물 분사⁽⁶⁾ 및 혼합연료의 분사기술⁽⁷⁾로 구분된다. 수분을 함유한 흡기공급과 물분사기술은 수분의 공급에 의한 연소실내의 불활성가스 증가효과와 잠열에 의한 연소실내의 온도의 저감을 가져오기 때문에 NOx의 저감에 매우 효과적이지만 과도한 수분은 미립자의 증가와 연소효율이 저감되는 문제도 아울러 가지고 있다⁽⁷⁾.

본 연구에서 제안하는 습식여과기는 공기가 물을 통과하면서 청정화 됨과 동시에 저온의 습한 공기로 변하게 된다. 이와 같이 변한 공기는 디젤기관의 연소용 공기로서 많은 장점을 가진다. 온도가 낮아진 공기는 밀도가 높아져 산소함량을 상승시키는 효과⁽⁸⁾가 있으며 또한 공기 중의 적당량의

수분은 피스톤 내의 침적되는 탄소도 감소시키는 효과⁽⁹⁾가 있다. 특히 실린더 내 고온으로 인해 생성되는 열적질소산화물(Thermal NOx)을 줄이기 위해서 습기를 분사하는 효과⁽¹⁰⁾와 같은 역할을 하게 된다.

본 연구에서는 연소공기를 물을 통과시킴으로써 발생하는 장점을 고려한 물을 이용한 디젤엔진 연소공기 여과용 습식여과기를 제안하고 개발하여 실적용에 따른 실용가능성을 검토하고자 한다.

2. 습식여과기의 설계

2.1 설계개요

개발을 위한 여과기의 외형은 기존의 건식여과장치와 유사한 형상을 유지하여 차량에 설치가 용이하도록 하였으며, 여과방식은 여과장치 내부에 물을 일정한 높이로 주입하여 외부의 공기가 물을 통과함으로써 공기 중에 함유된 미세먼지가 유체에 흡착되어 제거되도록 하였다. 공기가 물을 통과하면서 예상되는 압력저하를 보상하기 위하여 가압 팬을 사용하도록 하였다. 물을 통과한 공기는 수분함량이 높아 질 것으로 예상되어 2차 필터를 거치면서 일정량 수분이 제거되도록 하였다. 공기가 물을 통과하는 과정에서 와류현상이 발생할 것으로 예상되어 와류흡수 그릴(Grill)을 설치하였다. 설계를 위한 기본사양은 Table 1과 같다.

Table 1 Specification of the design

Items	Specification
Engine Model	DC23
Engine Displacement	0.02238 m ³
Max Revolution	1,800 rpm
Suction volume	4.0 m ³ /min(1800rpm) 3.5 m ³ /min(1500rpm)
Permissible initial suction resistance	220mmHg(0.29atm)
Suction duct dia	55 mm
Filter intake tube dia	100 mm

2.2 습식여과기의 모델링

여과기 형상 결정을 위한 컴퓨터 유한요소해석과 실험장치 제작을 위한 선행과정으로 3D CAD 소프트웨어를 이용하여 모델링하였다. 습식여과기의 모델링된 결과를 나타내면 Fig. 1과 같고 습식여과기의 구성을 나타내면 Fig. 2와 같다.

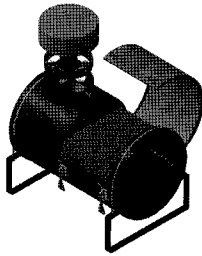


Fig. 1 Modeling of the wet type filter

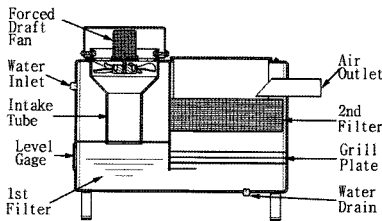


Fig. 2 Composition of the wet type filter

Table 2 Results of Air Flow Analysis

<p>Case 1 free surface at water reservoir</p>	
<p>Case 2 confined surface at water reservoir with plate</p>	
<p>Case 3 confined surface having same hole size with intake tube at water reservoir</p>	

공기의 유동은 유체가 흐르는 경로와 형상에 따라 많은 변화가 일어나게 되므로 여과기의 형상을 결정하기 위하여 유동해석을 수행하였다. 여과기의 형상에 따른 공기의 유동 해석은 CFD 상용 S/W인 FloWizard V2.04⁽¹¹⁾를 이용하여 수행하였으며 공기가 물을 통과하는 과정에 대해서는 유량과 압력강하 관계를 이용한 다공매체를 통과하는 것으로 단순화하여 적용하였다. 정확한 해석을 하기 위해서는 실험을 통한 파라메타를 구하여 적용해야 하지만 본 해석에서는 단순히 여과기의 최적의 형상을 찾기 위한 해석이므로 근사적인 파라메타를 가정하여 해석하였다. 여과기로부터 공기의 흡입압력은 7기압을 적용하였다. 여과기의 형상은 세 가지 경우에 대하여 실시하였으며 해석결과는 Table 2와 같다.

Case 1은 흡기 인테이크 관 출구에서 외부면 즉 수면위에 판으로 막히지 않은 경우로 전체적으로 공기유동은 비교적 자연스럽게 이루지고 있으나, 여과기 본체의 빈 공간에서 공기의 와류가 활발하게 이루어져 압력손실이 발생하게 된다. 또한 다른 경우에 비해 출구 유속이 낮아짐을 보였다.

Case 2는 가압 팬 인테이크부분을 1차 필터인 물과 접촉하게 하고 인테이크관 외부인 수면위에 판으로 막은 경우로 공기의 유동이 폭넓게 이루어지지 못하고 있다. 따라서 필터링효과가 떨어질 것으로 예상된다.

Case 3은 인테이크관이 수면 50mm 위에 설치된 경우로 Case 1,2에 비해 양호한 결과를 나타내었다. 공기유동이 폭넓게 이루어지고 있고 출구유속도 빠르게 나타났다.

유동해석의 결과로부터 Case 3의 경우에 대하여 여과기의 형상과 실험장치의 구성을 하기로 하였다.

3. 실험장치 및 방법

3.1 실험장치의 구성

본 실험 장치는 습식여과기의 엔진적용에 대한 검증과 습식여과기를 통과한 연소공기의 변화 상태를 측정하여 엔진에 미치는 영향을 평가하기 위한 것이다. 여과기의 입구와 출구에 센서를 각각 설치하여 액체필터(물)를 통과한 공기의 온도, 습도, 및 압력손실을 측정할 수 있도록 구성하였다. 실험장치의 구성을 나타내면 Fig. 3과 같다.

실험장치의 본체는 공기가 물을 통과하면서 여과되는 과정을 관찰하기 위하여 투명 아크릴판재로 제작하였다. 습식 여과기에 있어서는 하단에는 1차 필터로 액체필터를 채울 수 있도록 공간을 확보하고 출구 쪽에는 2차 필터인 스틸스크랩(Steel Scrap)을 설치하여 과도한 습도가 엔진으로 유입되는 것을 방지하도록 하였다.

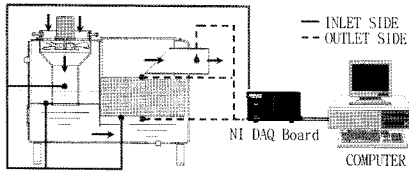


Fig. 3 Scheme of the experiment device

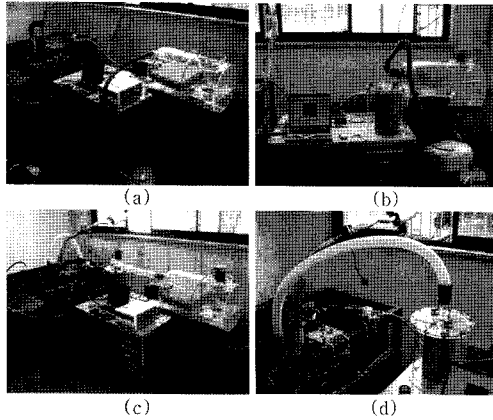


Fig. 4 A measurement experiment

Table 3 Calibration curve of the sensors

<ul style="list-style-type: none"> · Temperature sensor · Model : KEC-ATS1Ak3 · Input voltage: DC5V · $T = 21.3558 \times V^2 - 188.5782 \times V + 425.5567$ 	
<ul style="list-style-type: none"> · MAP sensor · Model : KEFICO-PA66-GF30 · Input voltage: DC5V · $P = \frac{(107 - 20) \times (V - 0.789)}{(5 - 0.789)} + 20 [kPa]$ 	
<ul style="list-style-type: none"> · Humidity sensor · Model : HUMIREL-HS-1100 · Input voltage: DC5V · $H = -17.7 \times V^3 + 112.7 \times V^2 - 243.5 \times V + 230.1$ 	

스틸 스크랩의 하단에는 액체필터의 와류로 인하여 스틸 스크랩에 수분방울이 직접 유입되는 것을 방지하기 위하여 다공판을 서로 어긋나게 타공하여 세 겹으로 설치하였다. 습식여과기의 입구에는 공기가 액체필터를 통과하면서 발생하는 압력강하를 보상하기 위해서 가압 팬을 설치하였다. 비교 실험을 위해 건식여과기 실험장치도 함께 제작하였다. 데이터측정을 위한 센서는 승용차량용인 자동차 전용센서를 사용하였다. 각 센서에 대하여 보정을 실시하였으며 특성식을 근사화하여 측정 프로그램에 적용하였다. 각 센서의 보정된 특성곡선은 Table 3과 같다.

3.2 실험방법

여과장치의 데이터측정실험은 건식여과기와 습식여과기의 두 경우에 대하여 수행하였다. 이는 기존의 건식여과기를 사용할 경우와 습식여과기를 사용할 경우의 엔진에 미치는 영향을 비교하기 위한 것이다. 1차적으로 진공펌프에 의한 실험을 수행하였고 2차적으로 엔진적용 실험을 실시하였다. 진공펌프에 의한 습식과 건식여과기의 실험실시 예를 각각 나타내면 Fig. 4 (a)(b)와 같고, 엔진적용실험의 실시 예를 나타내면 Fig. 4 (c)(d)와 같다. 데이터 수집을 위한 하드웨어와 소프트웨어는 각각 DAQ NI Board와 제어계측용 프로그램인 LabView V7.01을 활용하였다. 데이터 수집 프로그램의 구성을 나타내면 Fig. 5와 같다. 프로그램의 전체 화

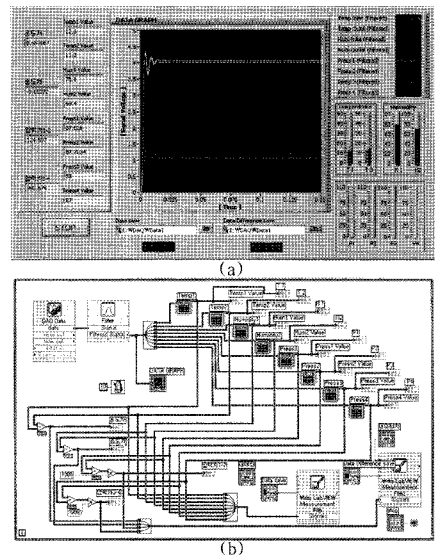


Fig. 5 Program of data measurement

면을 나타내면 Fig. 5 (a)와 같고, 프로그램 구성도는 Fig. 5의 (b)와 같다.

4. 실험결과 및 고찰

습식여과기 각 필터부의 설치에 따른 입구와 출구의 온도차는 Fig. 6과 같다. 외류흡수그릴만 설치한 경우에는 온도변화가 거의 없으나 금속 스크랩필터와 액체필터인 물을 통과한 경우는 온도차가 0.5℃ 정도 나고 있다. 팬을 가동할 경우의 온도차는 더 나고 있다.

실험시의 주의 온도가 약10℃ 정도의 낮은 온도인 것을 고려할 때 하절기에는 온도차가 증가할 것으로 예상된다⁽¹²⁾. 이러한 온도차는 연소공기의 밀도를 높게 하여 연소공기 충전률을 높이는 결과를 초래하여 엔진의 성능에 유리한 조건

으로 작용하게 될 것으로 판단된다.

입구습도와 출구습도의 차이를 습도 차(Humidity difference)로 정의하였고 결과는 Fig. 7과 같다.

액체필터를 통과한 습도 차는 약 4%정도 발생하고 있고, 이는 공기가 액체필터를 통과함으로써 액체가 증발함으로 발생하는 현상이다. 여기에서 습도차의 값이 음수인 것은 출구에서의 습도가 입구에서의 습도보다 높음을 의미한다. 실험시의 주의 온도가 약10℃ 정도의 낮은 온도인 것을 고려할 때 주의의 온도가 상승하면 습도차는 증가할 것으로 예상된다⁽¹²⁾. 액체필터를 통과하면서 발생한 4% 안팎의 습도증가는 디젤엔진에서는 문제가 되지 않을 것으로 판단된다. 오히려 디젤엔진에서는 엔진의 고온으로 발생하는 NOx를 줄이기 위하여 습기를 분사하는 것과 같은 효과를 유발하게 되어 장점으로 작용하게 될 것으로 판단된다. 연소공기가 액체필터인 물을 통과하면서 과도하게 습도가 증가할 것으로 예상하였으나 습도측정 실험을 통하여 연소공기로써의 문제가 되지 않음을 확인할 수 있었다.

각 필터부의 설치에 따른 입구와 출구의 압력차는 Fig. 8과 같다. 외류흡수그릴과 스틸 스크랩필터를 통과한 연소공기의 압력차는 약 2Pa로 미미하다. 액체필터를 통과하면서 압력차는 약 700Pa로 급격하게 증가하였다. 이러한 압력차는 액체필터인 물을 통과하면서 발생한 압력손실이 대부분 차지한다. 습식여과기 출구의 압력강하를 보상하기 위하여 가압팬을 설치하였으나 그 효과는 크게 나타나지 않았다.

건식여과기와 습식여과기의 압력손실을 측정하여 비교한 결과를 나타내면 Fig. 9와 같다. 건식여과기의 압력손실은 약15Pa이며, 습식여과기의 압력손실은 700Pa로 측정되었

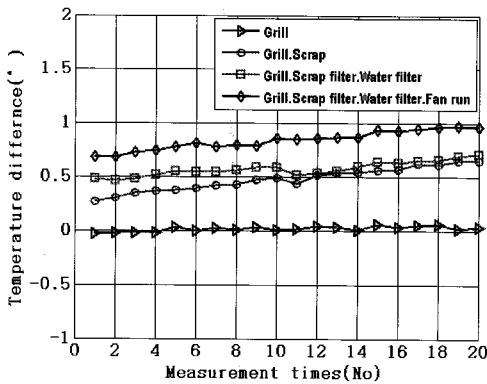


Fig. 6 Temperature difference of the air inlet and outlet

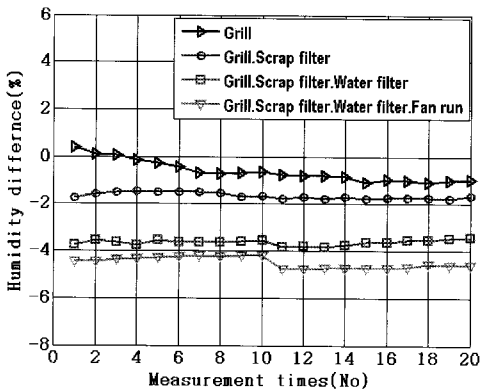


Fig. 7 Humidity difference of the air inlet and outlet

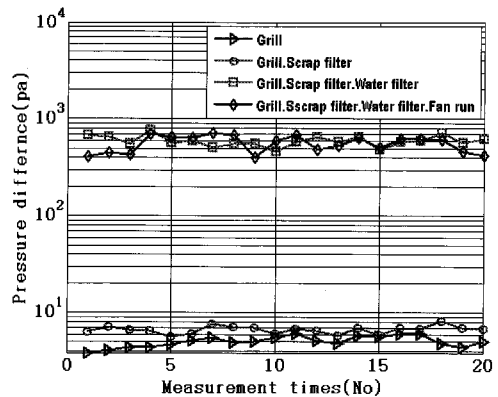


Fig. 8 Pressure difference between air inlet and outlet

다. 이는 건식여과기는 종이필터를 통과하면 되지만, 습식여과기는 연료용 공기가 인테이크 관 출구를 통하여 액체를 통과하여 디젤엔진으로 유입되어 압력강하가 상대적으로 높게 된다.

이상에서 성능실험을 수행한 습식여과기를 디젤엔진(DC23)에 적용하여 엔진 적용성을 검증하였다. 엔진가동 실험에 있어서 엔진의 회전수에 따른 건식여과기와 습식여과기의 압력손실 결과를 나타내면 Fig. 10과 같다. 엔진의 회전수에 따른 압력손실 차는 건식여과기에서나 습식여과기에서 모두 미미하였다. 하지만 습식여과기와 건식여과기 간의 상대적 압력손실은 진공펌프 실험에서와 동일한 경향을 보였다. 한편 진공펌프 실험에서 압력손실이 많이 발생되어 엔진의 시동과 작동에 문제가 있을 것으로 예상하였으나 엔진의 시동과 작동에는 문제가 없음을 확인하였다. 이것은 엔진의 초기 허용흡입압력이 약2,900Pa로 습식여과기의 흡입손실압력

700Pa보다 크기 때문인 것으로 판단된다.

습식여과기의 여과 상태를 시각적으로 확인하기 위하여 연막탄(smoke shell)을 이용한 여과실험을 수행하였다. 연막탄을 일정한 공간에 터뜨려 진공펌프를 사용하여 습식여과기내로 흡입하여 유체필터를 통과시키면서 여과되는 과정을 관찰하였다. 연막탄은 2분용을 사용하였다. 실험을 수행한 결과 연막탄의 분진이 액체필터인 물속에 흡착되어 붉게 물든 것을 확인할 수 있었다. 또한 습식여과기 출구의 상태는 연막탄의 분진이 그의 없음도 확인할 수 있었다. 이는 연막탄의 연막분진이 액체필터를 통과하면서 완벽하게 여과가 이루어짐을 알 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 디젤엔진 연소공기 여과기로서 물을 이용한 습식여과기를 제안하였고, 습식여과기를 통과한 연소공기의 온도, 습도, 압력 등의 상태를 측정하여 연소공기로서 적합성과 실제 엔진적용실험을 통하여 실용가능성을 검토하였다. 그리고 연막탄을 이용한 여과실험을 통하여 여과성능을 확인하였다. 본 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 습식여과기를 통과한 연소공기의 입·출구 온도차는 약 0.5℃로 미약하였다. 실험시의 주의 온도가 10℃ 정도임을 고려하면 주의 온도가 상승하게 되면 온도차가 더 날 것으로 예상되며, 온도차는 연소공기의 밀도를 높게 하는 효과가 있을 것으로 판단된다.
- (2) 습식여과기를 통과한 연소공기의 입·출구 습도차는 약 4%로 측정되었다. 연소공기가 물을 통과함으로써 습도가 과다하게 높아질 것으로 예상하였으나 그 차이는 크지 않았다. 4% 안팎의 습도증가는 디젤엔진에서의 고온으로 발생하는 Thermal NOx을 줄이기 위하여 습기를 분사하는 것과 같은 효과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다.
- (3) 엔진가동 중 건식습식여과기의 압력손실은 15Pa 정도이며, 습식여과기의 압력손실은 700Pa 정도로, 습식여과기의 압력손실은 건식여과기에 비해 아주 크다는 점을 확인하였다. 엔진적용실험에서는 시동과 작동이 정상적으로 이루어짐을 확인하였다.

후기

본 연구는 울산대학교 교비 및 BK21사업단 지원에 의한 것입니다.

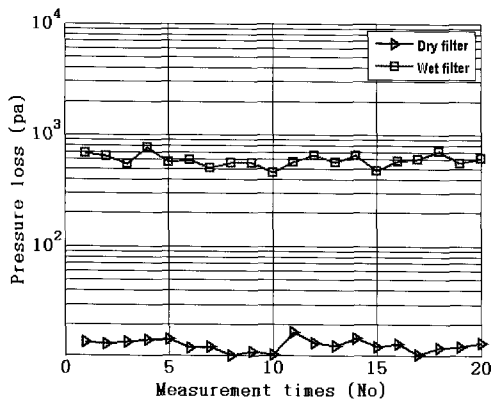


Fig. 9 Pressure loss of Wet filter and Dry filter

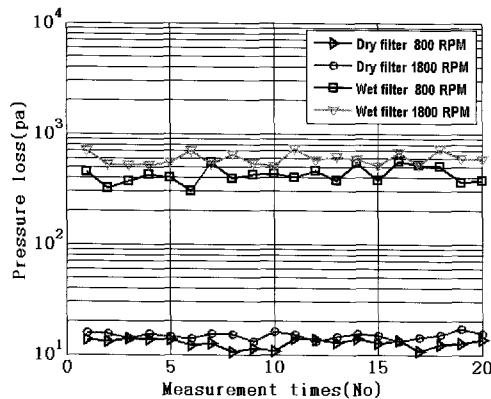


Fig. 10 Pressure loss by engine revolution

참고 문헌

- (1) Yang, S. Y., and Kim, Y. S., 2006, *A study on development of the filter and suction system for combustion air of diesel engines*, Project Report of Consortium of Small and Medium Business, pp. 9~33.
- (2) Kim, M. S., Rha, W. Y., and Oh, Y. S., 2004, "An Effect of Wet Type Air Filter in Heavy-Duty Diesel Engine," *Journal of Transactions of the Korean Society of Machine Tool Engineers*, Vol. 13 No. 3, pp. 98~103
- (3) Richard, S., Gu, J. Y., No, S. Y., Bae, C. S., Jung, G. S., and Hwang, S. S., 1996, *Introduction to Internal Combustion Engines*, M. Macmillan, pp. 207~212.
- (4) Lee, Y. H., 2004, *Water Filter*, Korea Patent: Application No.10-2004-0023572.
- (5) Shin, Y. H., 2000, *Wet Type Air Filter for Car*, Korea Patent: Application No.10-2000-0015942.
- (6) Ryu, K. H., and Oh, Y. T., 2003, "A Study on the Simulations Reduction of smoke and NOx by Water Injection through Intake Port in Diesel Engine," *Proceeding of The Korean Society of Mechanical Engineers 2003 Spring Conference*, Vol. 1, pp. 2186~2191.
- (7) Park, K., Park, T. I., and Kim, K. H., 1997, "Technology for Reducing NOx and Soot Particulate using EGR with Water Emulsified Fuel in Diesel Engines," *Journal of Korea Society of Marine Engineering*, Vol. 21. No. 4, pp. 356~363.
- (8) Hwang, S. J., Kim, M. Y., Kim, D. S., Lee, K. H., Lee, C. S., 2003, "Effect of Intake Air Temperature on the Combustion and Exhaust Emission Characteristics of HCCI Diesel Engine," *Proceeding of The Korean Society of Automotive Engineers 2003. 5 Spring Conference*, Vol. 1, pp. 240~246.
- (9) Nam, J. G., and Choi, J. S., 2005, "A Study on the Characteristics of NOx and another Emission by Water Injection System for a Light-Duty Diesel Engine," *Journal of Korea Society of Marine Engineering*, Vol. 29. No. 6, pp. 628~636.
- (10) Ryu, K. H., Yun, Y. J., and Oh, Y. T., 2002, "An Experimental Study on the Water Induction through the Intake Port for Reducing NOx Emission in IDI Diesel Engine," *Proceeding of The Korean Society of Automotive Engineers 2002 Spring Conference*, Vol. 1, pp. 361~366.
- (11) Fluent Inc, 2005, *FloWizard 2.0 User's Guide*, Manual PDF Version, Chap.1.1~Chap.8.7.
- (12) Arora, C. P., Kim, M. G., Sin, G. Y., and Ha, O. N., 2002, *Refrigeration and Air Conditioning*, McGraw-Hill, Jin Young Press, pp. 257~272.