

직접 분사식 디젤기관의 운전조건이 연소 및 배출가스특성에 미치는 영향

Effect of Operating Conditions in D.I Diesel Engine on the Characteristics of Exhaust Gas Emission and Combustion

조상곤*†

Sang-Gon Cho*†

(Received 16 September 2019, Revision received 10 February 2020, Accepted 10 February 2020)

Abstract: Recently, climate change has occurred rapidly due to the global warming, which has attributed to air pollution. As the temperature of the earth rises and precipitation increases, it greatly affects the ecosystem. Also the global world has very serious problems related to the air pollution due to the exhaust emissions of the diesel engine. The engine experiments are carried out to fixed fuel injection timing of BTDC 18°CA, using a four-stroke, four-cylinder in direct injection diesel engine. Therefore, the author has investigated the effects of suction air humidity and suction air temperature changing for the temperature of climate change on the characteristics of combustion and exhaust gas emissions. This study showed the suction air temperature that CO is decreased slightly, on the other hand NOx and soot were increased slightly in the case of suction air temperature changing, and also the pressure and rate of pressure rise were decreased. When the suction humidity was changed, NOx and soot were slightly decreased, CO slightly increased, and the pressure and rate of pressure rise were increased. Also the rate of heat release was decreased.

Key Words : Suction humidity, Brake specific fuel consumption, CO, NOx, Soot

1. 서 론

지구의 온난화로 인하여 기후변화가 급격하게 발생하고 있으며, 그 원인이 대기오염으로 인식하고 있다. 최근 각국의 날씨 변화 현황은 이상기온으로 인하여 가뭄 및 강수량이 증가하면서 생태계에는 많은 영향을 미치고 있다. 이러한 기후변화는 생활환경 및 생태계 변화가 심각해지면서

세계 각국은 기후변화에 대한 관심과 영향에 연구하고 있다. 따라서 전 세계적으로 급격한 기후변화로 평균온도가 상승하여 이상기온이 자주 발생하여 가뭄이 지속적으로 발생하였다. 또한 급격한 날씨 변화로 인한 국지성 폭우가 발생하여 홍수가 빈번하게 일어나 국가재난으로 이어졌고, 이러한 기후변화가 일상화되어 가는 것이 더욱더 큰 문제인 것이다. 이런 재난은 각국이 국제협력

*† 조상곤(ORCID:http://orcid.org/0000-0002-1937-8674) : 교수, 군산대학교 해양산업·운송과학기술학부 마린엔지니어링전공
E-mail: haerimho@kunsan.ac.kr, Tel : 063-469-1845

*† Sang-Gon Cho(ORCID:http://orcid.org/0000-0002-1937-8674) : Professor, Marine Engineering Major, Division of Marine Industry Transportation Science and Technology Marine Production System, Kunsan National University.
E-mail : haerimho@kunsan.ac.kr, Tel : 063-469-1845

을 통해서 예방하기 위한 대책이 수립되고 있다.¹⁾ 국내에서 기후변화에 적극적인 연구가 진행되고 정부에서 적극 추진하고 있으며 특히 태양광발전²⁾과 풍력발전³⁾이 많이 이루어지고 있다. 국외에서도 이에 대한 연구로는 풍력발전,⁴⁾ 태양광발전 및 바이오연료⁵⁾ 등을 연구하고 있다. 그러므로 우리 일상생활에서 많이 사용되는 기관에 대한 상세한 연구가 필요하여, Jang⁶⁾은 디젤엔진 운전조건으로 배기 배출물에 연구하였으며, Cho⁷⁾는 연료온도 변화에 대한 연소특성에 대하여 연구하였다. 또한 Choi⁸⁾는 배기 배출물에 대한 바이오디젤유의 영향에 대하여 연구하였고, Lim⁹⁾은 기관의 습도특성에 대하여 연구하였다.

현재 우리 생활환경에서 기후변화에 의한 기관의 배출가스를 확인하고, 효율적인 기관운전 방법을 제시하고자 하며, 본 연구는 직접 분사식 디젤기관에 흡입공기의 습도와 온도를 변화시켜서 기관 연소특성 및 배기 배출물특성에 미치는 영향을 분석·고찰하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

직접분사식 디젤기관 4 실린더 연소실의 압력 측정은 첫 번째 실린더에 압전식(Piezo-electric type) 압력변환기를 설치하였으며, 압력증폭기를 통해 데이터 취득 장치로 모니터링하여 저장 취득하였다. 연료소비율은 용적식 유량계를 사용하였다. 기관에 공급하는 흡입공기량의 계측은 오리피스식 공기유량계를 사용하였고, 가열기 및 습도기를 Fig. 1에 설치하여 일정하게 공급하였다. 그리고 기관의 흡입 측에 서지탱크(Surge tank)를 설치하여 흡입의 흐름이 균일하도록 하였다. 또한 기관에서 배출되는 배기가스는 배기가스 라인 가장 가까운 위치에 온도를 유지하도록 보온 설치하여 배기 배출물 분석기를 사용하였고, 기관의 출력은 와류형 전기동력계를 사용하여 로드셀 센서에 의해 부하별로 측정하였다. 본 실험기관은 직접 분사식 디젤기관으로 실험장치도는 Fig. 1에 주요 제원은 Table 1에 각각 나타내었다.

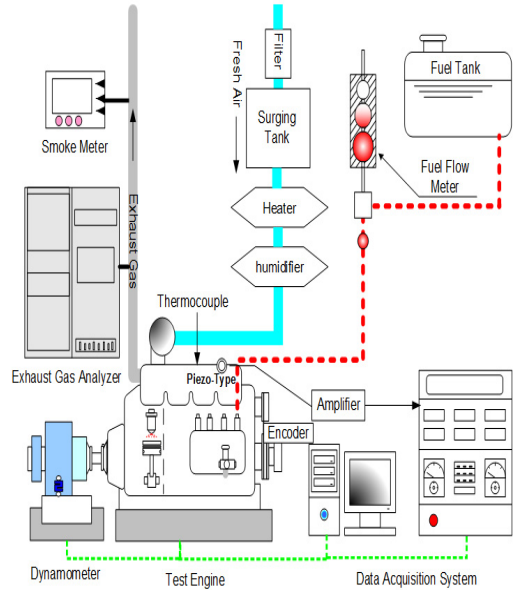


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

Table 1 Specification of test engine

Item	Specification
Cylinder number	4
Cooling type	Water-cooled
Cycle	4
Injection type	Direct injection
Bore×Stroke (mm)	102 × 100
Displacement volume (cc)	3,268
Max. output	43 PS / 1800 rpm (31.63 kW / 1800 rpm)
Compression ratio	17 : 1
Fuel injection timing	BTDC 18°
Firing order	1 - 3 - 4 - 2

2.2 실험방법

직접분사식 실험기관의 회전속도 1,400 rpm과 1,800 rpm의 경우에 대하여 기관부하를 0%, 25%, 50%, 75%, 100%까지 간격으로 균등하게 실험하였다. 기관회전수의 변동율은 동일한 조건하에서 ±0.5%이었고, 기관출력 부하의 변동율은 ±1.5% 이하로 하였다. 실험조건은 Table 2에 기준 온도는 20℃에서 흡입습도 RH 90%와 50℃ 간격으로

Table 2 Experimental conditions each load at 1,400, 1,800 rpm

Load (kW)	0%	25%	50%	75%	100%
RH 90%	0	7.91	15.82	23.7	31.63
20 °C	0	7.91	15.82	23.7	31.63
50 °C	0	7.91	15.82	23.7	31.63

일정하게 유지하였으며, 그리고 회전수, 부하 실험조건 중 3개의 파라미터를 2개를 고정하고 하나만을 변화시키면서 실험하였다. 기관의 냉각 열교환기는 수냉식방법 이용하여 실험하는 동안 기관의 냉각수와 윤활유 온도를 일정하게 공급하여 온도를 유지하였고, 기관의 작동 및 연소상태를 파악하기 위하여 지압선도, 각 부위(배기관 입·출구, 냉각수 입·출구, 윤활유, 흡입공기)의 온도를 측정하였다. 와류형 동력계는 표준중량(5 kg) 저울을 사용하여 압축인장의 보정실험을 하여 정확한 토오크 값을 확인한 후 동력을 측정하였다. 또 배기 배출물 가스 분석기와 매연측정기를 “0” 점 조정하고, 보정가스(측정범위 80%인 보정용 가스)농도와 일치하도록 자동 및 수동 보정실험을 한 후에 각종 배기 배출물을 측정하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 연료소비율

Fig. 2는 기관회전수 1,400 rpm 및 1,800 rpm에서 흡입공기 습도와 온도변화에 따른 연료소비율을 나타낸 그래프이다. 연료소비율은 흡입공기에 의한 습도와 온도변화가 저 부하에서 고 부하로 증가하면서 기관 출력당 연료소비율이 전체적으로 일정하게 감소하는 경향이며, 기관회전수 1,400 rpm 및 1,800 rpm에서는 마찰마모 증가 및 저항으로 효율이 감소하여 저속회전수보다 고속회전수에서 연료소비율이 약간 증가하는 경향을 나타내었다. 흡입공기 20°C에서 50°C로 증가하였을 경우 연료온도 변화에 따라 일정하게 약간씩 증가하는 경향이며, 흡입습도의 경우에도

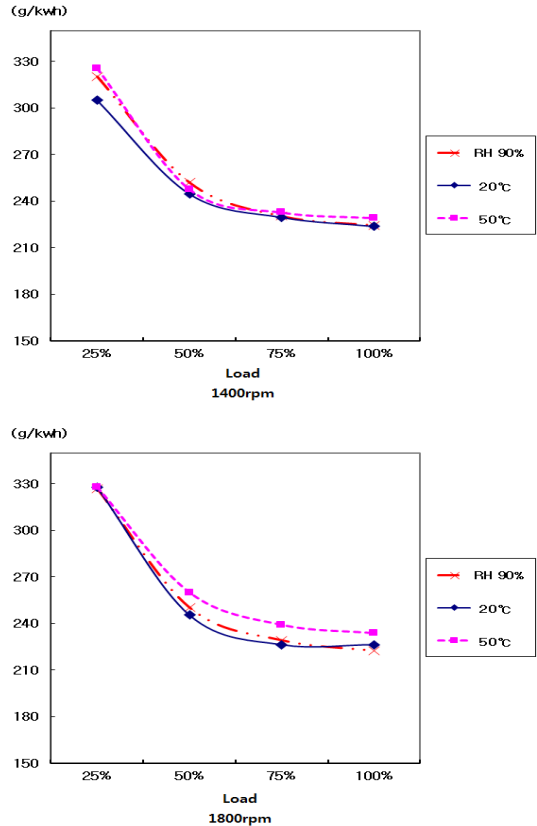


Fig. 2 Brake specific fuel consumption on suction air temperature & humidity at rpm

약간 증가하였다. 1,400 rpm에서는 흡입공기 50°C에서 부하 25% 6.37%, 50% 1.27%, 75% 1.43%, 100% 2.5로 증가하였고, 흡입습도의 경우는 25% 4.98%, 50% 3.09%, 75% 0.47%, 100% 0.41%로 약간 증가하여 큰 영향이 없음을 알 수 있었다. 기관회전수 1,800rpm에서는 흡입공기 50°C에서 부하 25% 5.94%, 50% 5.66%, 75% 3.28%, 100% 3.72%로 증가하였고, 흡입습도의 경우는 25% -0.21%, 50% 1.97%, 75% 1.20%, 100% -1.82%로 약간 증가하여 평균증가율은 0.28%로 큰 영향이 없음을 알 수 있었다. 그 이유는 흡입습도 증가로 인한 연료소모율은 거의 미미하여 큰 영향은 없었으나, 흡입온도가 증가함에 따라서 흡입공기량이 공기밀도에 의하여 전체적으로 감소하여 불완전연소가 증가하는 요

인으로 생각되며, 기관회전속도에 의한 실린더 내의 충전효율이 감소하여 확산연소 영역에서 연소상태가 향상되지 않기 때문으로 생각된다.

3.2 질소산화물(NOx)

Fig. 3은 NOx 배기 배출물 그래프이며, 기관회전수에서 부하증가에 따라 일정하게 증가하였으며, 그리고 흡입습도와 흡입공기 온도변화에서도 일정하게 증가를 하는 경향이다. 1,400 rpm에서는 흡입공기 50℃에서 부하 0% 19.17%, 25% 13.89%, 50% 5.55%, 75% 9.39%, 100% 7.10%로 증가하였으며, 평균증가율은 11.02%가 크게 증가하였다. 흡입습도의 경우는 0% 6.39%, 25% 10.30%, 50% 8.09%, 75% 8.32%, 100% 7.89%로 감소하였으며, 평균 감소율은 8.65%가 감소하였다. 기관회전수

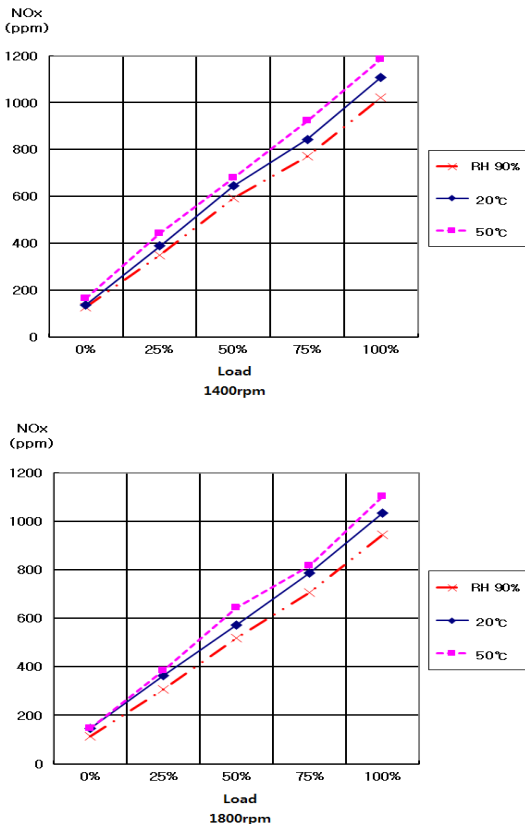


Fig. 3 NOx emission characteristics of various suction air temperature & humidity at rpm

1,800 rpm에서는 흡입공기 50℃에서 부하 0% 0.1%, 25% 5.58%, 50% 12.54%, 75% 3.73%, 100% 6.63%로 증가하였으며, 평균증가율은 5.72%로 증가하였다. 흡입습도의 경우는 0% 22.1%, 25% 15.61%, 50% 9.56%, 75% 10.46%, 100% 8.80%로 크게 감소하였으며, 평균 감소율은 13.30%로 크게 감소함을 알 수 있었다. NOx 배기 배출물 특성은 디젤기관에서 공기 중의 질소와 산소가 고온 하에서 반응에 의하여 발생하는데, 흡입공기와 연료가 혼합 연소 고온 반응하여 생성하였기에 저 부하보다 고 부하 상태에서는 분사되는 연료가 많으며, 이에 흡입공기 온도의 증가로 인한 실린더 내의 화염평균온도가 상승하므로 더 많이 발생되었다. 또한 회전수가 고속에 비하여 저속일 때는 팽창행정이 약간 길어 연소기간이 지연되어서 더 많이 발생되었고, 흡입습도의 경우는 흡입습도 수분이 증발잠열로 인한 화염온도의 저하와 수분이 흡입온도 보다 열 함유량이 많아서 연소가스 온도가 낮아져서 감소되었다고 생각된다.

3.3 일산화탄소(CO)

Fig. 4는 일산화탄소 그래프이며, 기관회전수에서 부하변화에 따른 흡입공기 습도와 온도변화를 나타내었다. 기관회전수에서 부하가 낮을수록 일산화탄소 배출량이 많이 발생하고, 점점 감소하는 경향을 나타냈는데, 부하 75%에서 최소로 배출되었지만 다시 부하 100%에서 크게 증가하는 경향을 나타내었다.

1,400 rpm에서는 흡입공기 50℃에서 부하 0% -40.98%, 25% -30.23%, 50% -27.97%, 75% -12.67%, 100% 53.52%로 감소 및 증가하였으며, 평균 11.67%가 감소하였다. 흡입습도의 경우는 0% 2.70%, 25% 15.59%, 50% 0.48%, 75% 0.95%, 100% -28.79%로 감소 및 증가하였으며, 평균 1.81%가 감소하였다. 기관회전수 1,800 rpm에서는 흡입공기 50℃에서 부하 0% -35.71%, 25% -38.39%, 50% -30.38%, 75% -8.21%, 100% 54.98%로 감소 및 증가하였으며, 평균 11.54%로 증가하였다. 흡입습도의 경우는 0% -1.37%, 25% 8.81%, 50% 6.43%, 75% -1.34%, 100% -14.47%로 크게 감

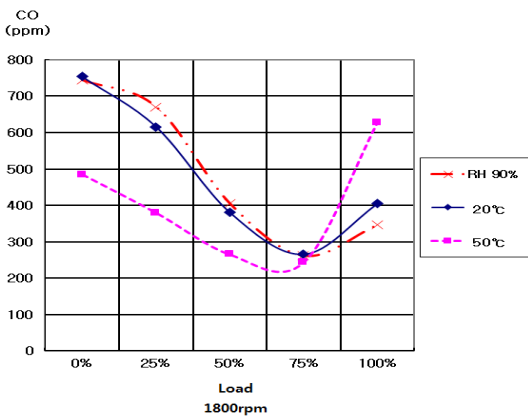
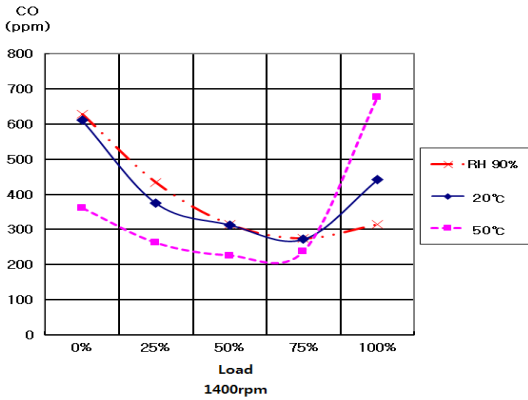


Fig. 4 CO emission characteristics of various suction air temperature & humidity at rpm

소 및 증가하였으며, 평균 0.39%로 감소함을 알 수 있었다. 그 이유는 CO 배출가스는 국부적으로 공기부족으로 인한 불완전연소와 이산화탄소의 해리에 의하여 많이 발생하는데, 본 실험에서도 연소상태가 불완전한 연소로 인하여 생성하여 부하 100%에서 급증하고, 저 부하에서도 증가하였는데 이것은 산소과잉 상태일지라도 부분 확산연소가 좋지 않으므로 인한 불완전연소로 연소가 온도가 낮아지기 때문으로 생각된다. 이것은 기관의 특성에 따라 약간 차이가 있지만 대부분 부하 50%에서 75%까지 최소로 배출되고 다시 증가하는 경향이다. 흡입습도의 연소상태도 비슷하였고, 연소상태가 부하와 흡입의 영향으로 감소 및 증가하였다고 생각된다. 그래서 부하변화에 대한 곡선이 오목한 형태로 Fig. 5로 나타났는데 이러한 경향은 기관회전속도를 변경시켜도 유사하였다.

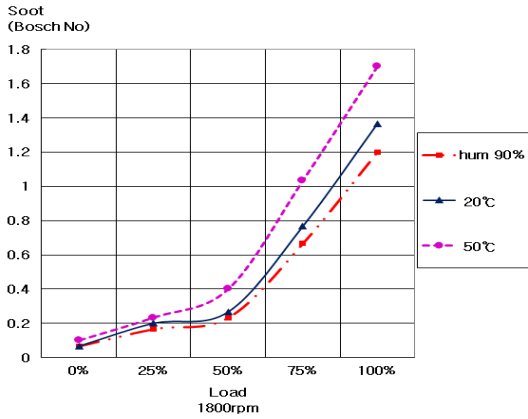
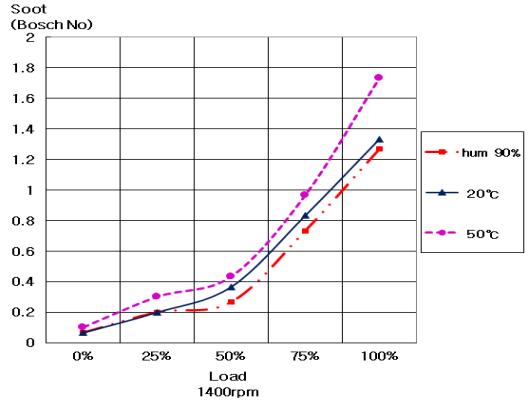


Fig. 5 Soot emission characteristics of various suction air temperature & humidity at rpm

3.4 매연(Soot)

Fig. 5는 매연 배출물 그래프이며, 부하가 증가하면서 일정하게 매연배출물이 증가하였으며, 부하 75%에서는 크게 증가하였다. 기관회전수, 흡입습도와 흡입온도도 비슷한 경향을 알 수 있었다. 1,400 rpm에서는 흡입공기 50°C에서 평균 32.84%가 증가하였으나, 흡입습도의 경우는 평균 8.85%가 감소하였다. 기관회전수 1,800 rpm에서는 흡입공기 50°C에서 평균 35.17%로 증가하였으나, 흡입습도의 경우는 평균 10.88%로 감소함을 알 수 있었다. 매연은 연료가 부분 산화한 탄화수소가 저 부하에서 배출되며, 고 부하에서는 연료분무 중 국부적으로 과도히 농후한 부분의 연료가 고온에서 분해하여 탄소로 유리되어 배출되는 경향으로 실험결과도 모든 영역에서 부하가 증가하면서 많이 배출 되었는데 그 원인은 부하가 증가하면 할

수록 연료소비량이 많아져 불완전연소가 증가하여 발생된다고 생각된다. 또한 흡입온도가 증가하면서 연소상태 불완전연소가 증가함으로써 매연 배출량이 많이 발생되었고, 하지만 흡입습도 경우는 온도에 비하여 연소상태가 양호하여 감소되었다고 생각된다.

3.5 압력 및 상승률

Fig. 6은 기관회전수에서 흡입공기 습도와 공기 온도변화에 따른 압력 및 상승률을 나타낸 그래프이다. 1,400 rpm에서 실린더압력은 흡입습도의 경우에 부하 100% 0.33% 증가하였으나, 흡입공기 50℃에는 0.81% 감소하였다. 1,800 rpm에서 흡입 습도의 경우에 실린더압력은 부하 100% 1.59% 증가하였으나, 흡입공기 50℃에는 2.59% 감소하였다. 1,400 rpm에서 압력 상승률은 흡입습도의 경우에 부하 100% 5.86% 증가하였으나, 흡입공기

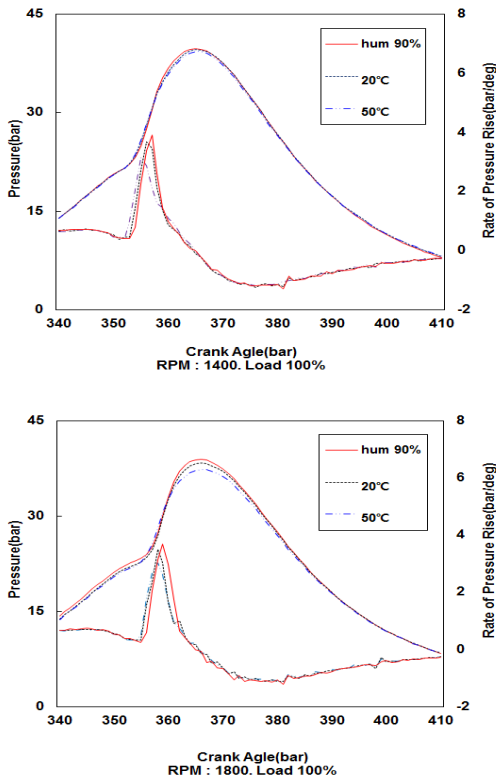


Fig. 6 Pressure & Ratio of pressure rise on various air suction temperature & humidity at rpm

50℃에는 14.39% 감소하였다. 1,800 rpm에서 흡입 습도의 경우에 압력 상승률은 부하 100% 7.25% 증가하였으나, 흡입공기 50℃에는 12.46% 감소하였다. 흡입공기 온도 상승으로 인한 실린더 내의 공기량이 부족하여 낮아지는 원인이며, 하지만 흡입습도로 인한 실린더 내의 압력은 증가하였는데 흡입공기량의 농도가 많아져서 발생되었으며, 또한 흡입습도 경우에는 착화시기가 약간 지연되는 경향이 있는데, 그 이유는 가습으로 인한 수분의 증발잠열로 연소착화시기를 지연시키기 때문으로 생각된다.

3.6 열발생을 및 누적열발생량

Fig. 7은 기관회전수에서 흡입공기 습도와 온도 변화에 따른 열발생을 및 누적열발생량을 나타낸

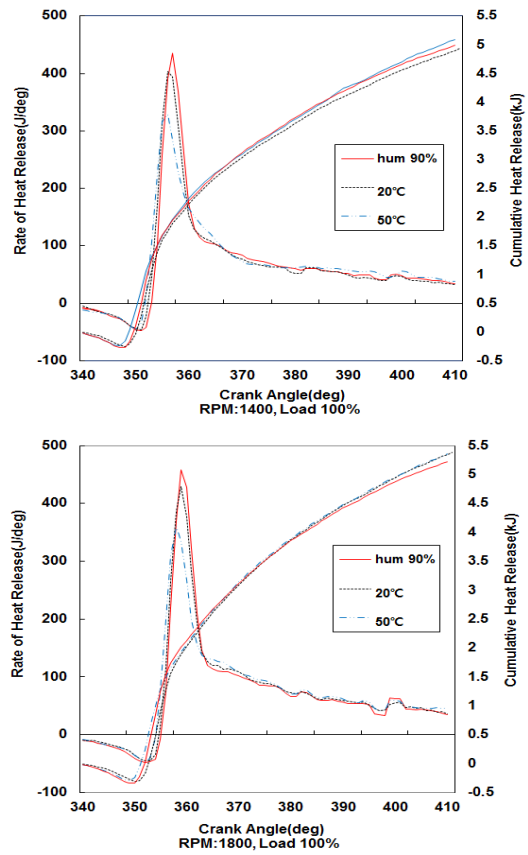


Fig. 7 Rate of heat release & CHR on various suction air temperature & humidity at rpm

그래프이다. 1,400 rpm에서 열 발생량은 흡입습도의 경우에 부하 100% 7.91% 증가하였으나, 흡기 공기 50℃에는 18.48% 감소하였다. 1,800 rpm에서 흡입습도의 경우에 열 발생량은 부하 100% 6.50% 증가하였으나, 흡기공기 50℃에는 16.05% 감소하였다. 흡기공기 온도가 증가함에 따라서 열발생율이 감소하는데 이것은 실린더 내의 연소조건에서 흡입공기량이 부족하여 발생하였고, 또한 연소시작 점도 앞으로 당겨져 열 발생율도 앞으로 당겨짐을 알 수 있다. 하지만 흡입습도로 인한 경우는 흡기공기의 비중량이 크게 되어 열발생율이 증가되었고, 착화시점도 1°~2°CA 정도 늦어짐을 알 수 있었다.

4. 결 론

최근 기후변화가 심각하게 변화하고 있는데, 이에 따른 흡입공기 습도와 온도가 변화하면 어떤 영향이 있는지 연구하였으며, 디젤기관 운전조건에서 흡입조건에 따라 연소 및 배출 가스 량이 변화하였으며, 이에 기관특성에 적합한 흡기공기의 일정한 온도 및 습도가 적절하면 배출 가스량 저감이 가능하며, 본 연구결과는 다음과 같다.

1) 연료소비율은 흡입공기에 의한 습도와 온도 변화가 부하 증가로 전체적으로 일정하게 감소하는 경향이며, 기관회전수 1,400 rpm 및 1,800 rpm에서도 비슷한 경향을 나타냈었다. 흡입공기 20℃에서 50℃로 증가하였을 경우 흡입온도 변화에 따라 일정하게 약간씩 증가하는 경향이다. 흡입습도 경우는 약간 증가하였다.

2) 질소산화물은 연소실 연소의 고온반응으로 1,400 rpm에서는 흡입공기 50℃에서 평균증가율은 11.02%로 증가하였다. 하지만 수분증발 잠열로 인한 흡입습도의 경우는 평균 감소율은 8.65%가 감소하였다. 기관회전수 1,800 rpm에서는 평균증가율은 5.72%로 증가하였다. 흡입습도의 경우는 평균 감소율은 13.30%로 크게 감소함을 알 수 있었다.

3) 일산화탄소는 불완전한 연소로 인한 부하 변화에 따라 1,400 rpm에서는 흡입공기 50℃에서 평

균 11.67%가 감소하였다. 흡입습도의 경우는 감소 및 증가하였으며, 평균 1.81%가 감소하였다. 기관회전수 1,800 rpm에서는 감소 및 증가하였으며, 평균 11.54%로 증가하였다. 흡입습도의 경우는 평균 0.39%로 감소함을 알 수 있었다.

4) 매연 배출물은 1,400 rpm에서는 흡입공기 50℃에서 평균 32.84%가 증가하였으나. 흡입습도의 경우는 평균 8.85%가 감소하였다. 기관회전수 1,800 rpm에서는 흡입공기 50℃에서 평균 35.17%로 증가하였으나, 흡입습도의 경우는 평균 10.88%로 감소함을 알 수 있었다.

5) 압력 및 압력 상승율은 1,400 rpm에서 실린더압력은 흡입습도의 경우에 부하 100% 0.33% 증가하였으나, 흡입공기 50℃에는 0.81% 감소하였다. 1,800 rpm에서 흡입습도의 경우에 실린더압력은 부하 100% 1.59% 증가하였으나, 흡입공기 50℃에는 2.59% 감소하였다.

6) 열발생량은 1,400 rpm 흡입습도의 경우에 부하 100%에서 7.91% 증가하였으나, 흡입공기 50℃에는 18.48% 감소하였다. 1,800 rpm에서 흡입습도의 경우에 열발생량은 부하 100%에서 6.50% 증가하였으나, 흡입공기 50℃에는 16.05% 감소하였다.

Reference

1. Y. H. Park, S. Y. Chung, Y. H. Son and W. K. Lee, 2010, "Investigation on Enhancing Efficiency in International Cooperation for Climate Change Adaptation of Republic of Korea", Journal of Climate Change Research, Vol. 1, No. 2, pp. 179-188. (<https://doi.org/10.9726/kspse.2017.21.6.110>)
2. K. S. Lee, 2016, "A Study on the Photovoltaic System Inverter Sizing", The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers, Vol. 65, No. 5, pp. 804-810. (<https://doi.org/10.5370/KIEE.2016.65.5.804>)
3. S. W. Kim, 2013, "Turbulence Intensity Effects on Small Wind Turbine Power Performance", Journal of the Korean Solar Energy Society, Vol. 33, No. 6, pp. 19-25.

- (<https://doi.org/10.7836/kses.2013.33.6.019>)
4. Michael C. Brower et al., 2013, "A study of wind speed variability using global reanalysis data", Technical Papers of AWS Truepower, pp. 3-4.
 5. S. C. Park, and J. S. Lee, 2014, "Status and Challenging Issues of the Advanced Biofuels", New And Renewable Energy, Vol. 10, No. 4, pp. 16-21.
(<https://doi.org/10.7849/ksnre.2014.10.4.016>)
 6. S. H. Jang, D. K. Koh and S. K. Ahn, 2002, "An Effect of Operating Conditions on Exhaust Emissions in a Small Turbocharged D.I. Engine", Journal of the Korea Society for Power System Engineering, Vol. 6, No. 2, pp. 12-17.
 7. S. G. Cho, 2017, "A Study on the Characteristics of Combustion and Performance by Changing Temperature in Diesel Fuel", Journal of the Korea Society for Power System Engineering, Vol. 21, No. 6, pp. 110-116.
(<https://doi.org/10.9726/kspse.2017.21.6.110>)
 8. B. C. Choi, C. H. Lee and H. J. Park, 2002, "Power and Emission Characteristics of DI Diesel Engine with a Soybean Bio-diesel Fuel", Journal of the Korea Society for Power System Engineering, Vol. 6, No. 3, pp. 11-16.
 9. J. K. Lim and D. H. Kim, 2000, "Effects of Suction Air Humidity on the Combustion and Exhaust Emissions Characteristics in Diesel Engine", Journal of the Korean Society of Marine Engineering, Vol. 24, No. 4, pp. 421-426.