

배기 출구 개도율이 배기 압력과 온도 및 엔진 성능에 미치는 영향

김철정¹ · 최병철² · 박권하[†]

(원고접수일 : 2013년 7월 19일, 원고수정일: 2013년 8월 31일, 심사완료일 : 2013년 10월 3일)

The effect of exit opening rate on exhaust gas pressure, temperature, and engine performance

Cheol-Jeong Kim¹, Byung-Chul Choi², Kweon-Ha Park[†]

요약: 엔진 배기 저감이나 열효율 향상을 위하여 배기관에 많은 장치들이 부착되고 있다. 이러한 장치들은 배기구의 개도면적을 줄이게 되고 배기 압력을 증가시킨다. 배기압력의 증가는 원활한 가스 교환을 방해하여 엔진 성능이 저하되는 원인이 된다. 그러나 적당한 배압의 증가는 잔류가스의 효과에 의하여 질소산화물을 감소시킬 수 있다. 본 연구에서는 배기 압력 증가가 엔진 성능에 미치는 영향을 평가하기 위하여 배기관 끝단의 개도량을 변화시켜 배기 압력을 조절하면서 엔진 실험을 수행하였다. 실험 결과 무부하에서 배압이 미소하게 증가된 경우에 연료 소모율이 저감되고 동시에 질소산화물이 저감되었지만 과도하게 배압이 증가하는 경우에는 연소의 악화로 유해 배기가스가 크게 증가되었다.

주제어: 배압 상승, 배기 배출물, 엔진 성능, 출구 개도율

Abstract: Multiple devices have been installed to reduce exhaust emissions and to increase thermal efficiency. Those devices reduce the exhaust pipe opening area and increase the exhaust gas pressure. The pressure increase disturbs a gas flow and has a bad effect on the engine performance. However there is some study that NOx can be reduced with exhaust gas pressure increase. In this study an engine performance is tested with various opening ratios. The result shows that the fuel consumption rate is reduced in case of little amount of the pressure increase, and NOx is reduced with the pressure increase, while the concentration of the toxic exhaust gases are increased in the case of high back-pressure.

Keywords: Back-pressure rise, Exhaust emission, Engine effect, Exit opening rate

1. 서 론

에너지보존과 CO₂ 배출저감에 대한 사회적 요구가 급속히 증가하고 있다. 2005년 발효된 교토의정서에서는 CO₂ 배출량을 1990년 기준으로 2012년까지 5.2% 감축을 목표로 하고 있다. 한국의 경우 2000년 5억 2900만톤으로 1990년 이후 85.4%나 증가하였다. 이 배출량은 세계 9위에 해당되며 증가

율은 OECD 국가 중 1위를 차지하고 있다. 따라서 정부에서는 적극적인 감축정책을 펴고 있다. CO₂ 배출을 저감하기 위해서는 에너지사용량을 줄여야 하는데, 국내 총에너지 사용량 중 수송 분야가 19.8%로 많은 비중을 차지하고 있다. 따라서 수송 분야의 효율 향상을 위한 기술 개발이 필요하다. 선박의 경우 엔진에 공급되는 총에너지의 50% 정

[†]Corresponding Author: Division of Mechanical & Energy Systems Engineering, Korea Maritime and Ocean University, Dongsam-dong, Yeongdo-gu, Busan, 606-791, Korea, E-mail: khpark@kmou.ac.kr, Tel: 051-410-4367

¹ Department of Mechanical Engineering, Korea Maritime and Ocean University, E-mail: inad25@nate.com, Tel:

² Ship & Plant Research Team, Korean Register of Shipping, E-mail: byungchul.choi@gmail.com,

도가 추진력으로 사용되고 있어 매우 효율적이지만 배기관을 통하여 대기 중으로 배출되는 30% 정도의 손실에너지를 효과적으로 회수할 수 있다면 수송기관의 효율을 더욱 향상시킬 수 있으며 이산화탄소의 배출량도 크게 저감시킬 수 있을 것으로 판단된다[1].

그러나 배기열 회수 기술이 적용되기 어려운 원인은 배출가스의 온도가 중저온이기 때문에 환경친화적이고 잠열이 높은 물을 작동유체로 사용하기가 적합하지 않다는 것이며, 수송기관에서 배출되는 배기가스의 상태가 기관의 부하에 따라 크게 변동하기 때문에 전 변동영역에 적합한 시스템을 선정하기가 어렵고, 배기 통로에 회수시스템을 부착함으로써 증가되는 배기 압력이 기관의 성능에 영향을 준다는 것[2]-[5]이다. 그러나 순효과의 기능으로 배기 재순환 효과가 질소산화물을 저감시키는 것으로 보고되었다[6][7].

본 연구는 배기 열회수 시스템 구성을 위한 기초 연구로 엔진 작동 조건에 따라 배기관 내의 배기 온도와 배기 압력, 배기배출물, 연료소비율을 측정하여 출구 개도율이 배기 및 엔진성능에 미치는 영향을 분석하고자 한다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 실험 장치 및 구성

Figure 1은 실험 장치의 개략도이다. 본 실험에 사용되는 엔진의 사양은 Table 1과 같다. 배기관의 크기는 직경이 93mm, 길이가 4,000mm이다. 댐퍼의 위치는 Figure 1의 D1, D2, D3에 각각 설치되어 있으며 D1은 배기 매니폴더에서 0.5m, D1에서 D2까지 1.5m이며 D2와 D3는 1m 간격이다. 배기 압력을 측정하기 매니폴더 직후에 압력센서(P1)를 설치하였으며, 온도 센서 T1은 매니폴더 바로 뒤에 위치하고 T2, T3, T4는 각각 1m, 2m, 3m에 위치한다. 압력센서는 볼트출력신호이며 최대 측정 압력은 0.5 MPa이다. 온도센서는 K타입 열전대로 최대 측정 온도는 1,300℃이다. 센서로 받은 데이터는 LabView를 통하여 컴퓨터로 수집된다. 댐퍼 설치에 따른 온도 변화를 측정하기 위해 온도센서 뒤

로 0.3m 거리를 두고 댐퍼를 설치하였다. Figure 2는 출구 개도율을 조절하기 위하여 전체 개도율(2,026mm²)에서 10%, 6%, 4% 면적의 홀을 가진 판을 제작한 사진이며 D3위치에 설치하였다. 엔진 실린더 압력을 측정하기 위해 최대 측정 압력 20MPa의 압력 센서를 1번 실린더에 설치하여 측정하고 배기가스는 Testo 330 모델을 사용하여 일산화탄소, 질소산화물을 측정하였으며 스모크는 여지반사식 Diesel Smoke Tester DS-330D 모델을 사용하여 측정하였다.

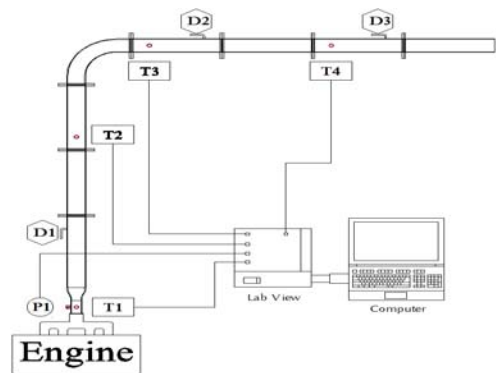


Figure 1: Experimental setup



Figure 2: Photo of opening adjust plates

2.2 실험 방법

2.2.1 출구 개도율 설정

기존 배기관 출구를 일정한 비율로 감소시켜 배기 압력이 허용 압력 이상 나타내는 개도 면적을 기존 개도량으로 설정하였다. 허용 압력과 기존 배기관 직경은 Table 2의 배기 시스템에서 볼 수 있다. Figure 3은 출구 개도율 변화에 따른 배기 압력 변화를 나타내는 그래프이다. 그래프를 보면 허용

압력 이상 상승하는 개도율은 기존 배기관 면적의 10%(680mm²)로 이를 기준 개도율로 설정하고 **Figure 4**는 10%이하의 개도율의 압력 변화를 나타낸 그래프로 개도율 2%에서 엔진의 운전이 불가할 정도의 과도한 배압 상승을 나타내므로 2%이하의 개도율은 실험에서 제외시켰다. 개도율 8%가 실험에서 제외된 이유는 개도율 10%와 거의 차이가 나지 않기 때문에 실험하지 않았다. 따라서 개도율을 100%, 10%, 6%, 4%의 4가지로 설정하였다.

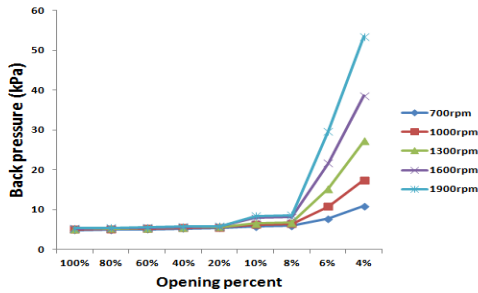


Figure 3: Back pressure with opening percent

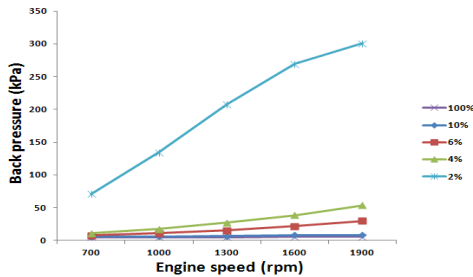


Figure 4: Back pressure with engine speed

2.2.2 엔진 운전 조건

엔진 회전 속도별 실험에서는 엔진 최저 속도 700rpm에서 600rpm 간격으로 1300rpm, 1900rpm의 세 가지 경우로 실험하였고 이때 엔진 부하는 무부하로 고정하였다. 엔진 부하별 실험에서는 수동력계를 이용하여 엔진 부하를 idle, 50%, 100%로 실험하였고 이때 엔진 속도는 1300rpm으로 고정하여 실험하였다. **Table 1-3**은 실험엔진 및 조건을 종합하여 나타낸 표이다.

Table 1: Specifications of test engine

| | |
|---------------------------|-----------------------------|
| Type | Turbo Diesel Engine(D4AK-C) |
| No. of cy1. & Arrangement | 4-IN line |
| Combustion chamber type | Direct Injection |
| Total piston displacement | 3,298cc |
| Compression ratio | 16:1 |
| NO-load minimum speed | 700~750 RPM |
| Peak torque (KSR 1004) | 25.5/1800 (kg·m/RPM) |

Table 2: Exhaust system

| | |
|---|--------------------------|
| Maximum allowable back pressure | 50 mmHg |
| Exhaust pipe size | 93 mm |
| Max. Exhaust gas temp. at turbocharger outlet | 425 °C |
| Exh. gas flow rate at rate output | 15.5 m ³ /min |

Table 3: Test conditions

| Engine speed | Engine load | Damper position | Exhaust pipe opening | |
|--------------|-------------|-----------------|----------------------|-----------------|
| | | | Opening area | Opening percent |
| 700rpm | idle | Dx | 2026mm ² | 100% |
| 1300rpm | 50% | D1 | 680mm ² | 10% |
| 1900rpm | 100% | D2 | 408mm ² | 6% |
| | | D3 | 272mm ² | 4% |

3. 결과 및 고찰

3.1 개도율 감소에 따른 배기 압력 및 온도

3.1.1 엔진 운전 조건별 배기 압력

Figure 5는 무부하에서 개도율을 변화시킬 경우의 배기 압력 변화를 나타낸 그래프이다. 엔진 회전 속도가 700rpm에서는 개도율 100%에서 개도율 4%까지 감소할 때 배기압력이 6kPa 증가한다. 1300rpm에서는 개도율이 4%로 감소하면 배기압력이 22kPa 증가로 700rpm에서보다 3배 이상 배압이 증가했다. 1900rpm에서는 개도율 6%로 감소하면

배기 압력이 24kPa 증가로 1300rpm에서 개도율 4%로 감소시킨 것과 비슷한 증가량이며 개도율 4%에서는 개도율 6%의 2배인 48kPa까지 증가한다.

Figure 6은 1300rpm에서 부하에 따른 배압 상승을 나타내는 그래프로 1300rpm, 무부하 조건에서 개도율이 4%로 감소하면 22kPa 증가하고 중부하에서 개도율 감소에 따른 배압 상승은 25kPa, 고부하에서는 36kPa 증가로 엔진 속도 상승에 비해 배기압력 상승률이 상대적으로 작다.

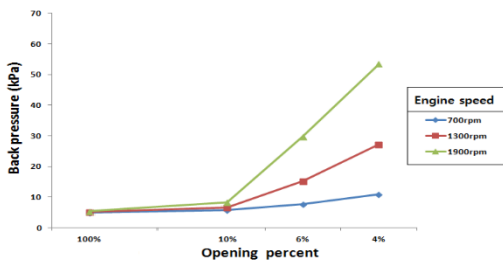


Figure 5: Exhaust gas pressure with engine speed variation

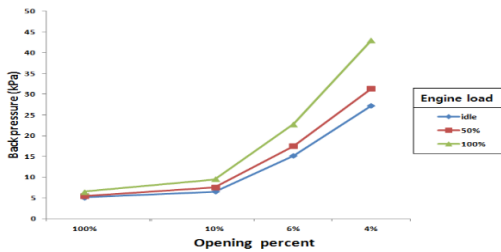


Figure 6: Exhaust gas pressure with engine load variation

3.1.2 엔진 운전 조건별 배기 온도

Figure 7은 엔진 회전 속도별로 개도율 감소에 따른 배기 온도 변화를 나타낸 그래프이다. 700rpm에서는 배기 온도가 평균 120℃로 개도율이 감소해도 온도변화가 거의 없다. 1300rpm에서 평균온도는 160℃정도로 700rpm에서보다 평균 온도는 40℃정도 상승했지만 700rpm과 마찬가지로 개도율이 감소함에 따른 온도 상승은 보이지 않았다.

1900rpm에서는 개도율이 감소함에 따라 배기온도가 약 50℃상승하였다.

Figure 8은 엔진 부하에 따른 배기 온도를 나타낸 그래프로 무부하에서는 평균온도 160℃, 중부하에서는 270℃, 고부하에서는 470℃로 부하가 증가함에 따라 100℃이상 배기 온도가 상승하였다. 개도율 감소에 따른 배기 온도 상승은 700rpm과 1300rpm에서는 거의 온도가 상승하지 않았다. 그러나 1900rpm에서는 개도율이 4%에서 최대 70℃정도 상승하였다. 이는 엔진 회전수가 증가함에 따라 배기 유량이 증가하고 빠져나가지 못하는 배기 가스가 배기관에 정체됨에 따라 배기관내 온도가 증가하는 것으로 판단된다.

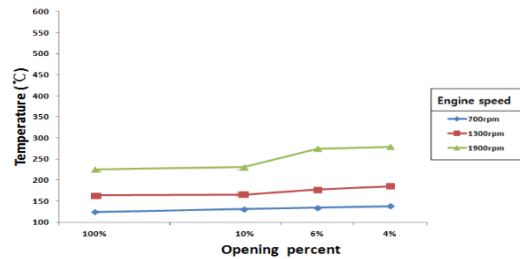


Figure 7: Exhaust gas temperature with engine speed variation

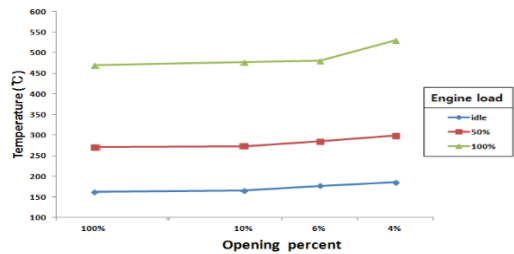


Figure 8: Exhaust gas temperature with engine load variation

3.2 댐퍼 위치와 조합에 따른 배기 압력 및 온도

3.2.1 댐퍼 위치에 따른 배기 압력

기존 개도율의 위치 변화와 조합된 경우의 배기 압력을 알아보기 위하여 댐퍼를 닫은 경우 개도율

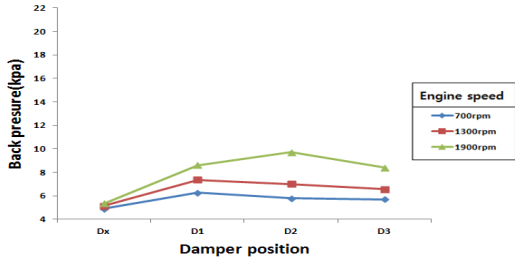


Figure 9: Exhaust gas pressure with damper position variation

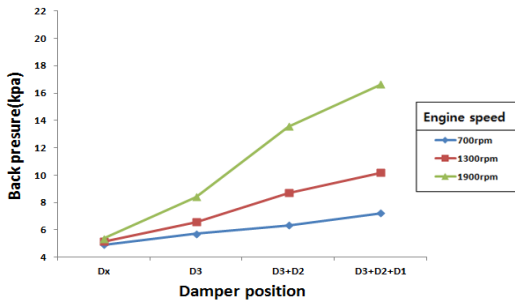


Figure 10: Exhaust gas pressure with damper combination variation

은 개도율 10%(680mm²)로 설정하였다. Figure 9는 무부하에서 댐퍼를 위치별로 닫았을 때 배기 압력을 나타내는 그래프이다. 700rpm과 1300rpm인 경우 배기 압력이 댐퍼를 완전 개방한 Dx에 비하여 D1의 경우 각각 0.75kPa, 2.75kPa 증가되며 D2, D3로 댐퍼 위치가 멀어짐에 따라 배압이 감소한다. 한편 1900rpm의 경우는 D1보다 D2인 경우가 가장 높은 9.72kPa 증가되고 있다. 이는 배기량이 증가되면 메니폴더에서 2.5m 떨어진 곳에 댐퍼를 설치하는 경우가 높은 배압을 나타냄을 알 수 있다.

Figure 10은 댐퍼를 중복으로 닫을 경우의 배기 압력 변화를 나타낸 그래프로 700rpm에서 댐퍼 중복에 의한 배압 상승은 2kPa 정도로 개도율을 감소시켰을 때보다 낮게 상승한다. 1300rpm에서는 5kPa 상승으로 700rpm에서 개도율을 감소시켰을 때와 비슷한 수준으로 배압이 상승하며 1900rpm에서는 1개의 댐퍼가 조합되는 경우 평균 4kPa의 배압 상승이 된다. 3개의 댐퍼를 모두 닫은 경우 1900rpm에서는 배기 압력이 16kPa로 무부하,

1300rpm, 개도율 6%와 비슷한 정도의 배기 압력이 된다.

3.2.2 댐퍼 위치와 조합에 따른 배기 온도

Figure 11과 Figure 12는 댐퍼를 위치별로 하나씩 닫은 경우와 중복해서 닫는 경우의 배기 온도 변화를 나타내는 그래프이다. 평균적으로 700rpm에서 배기 온도는 120℃, 1300rpm에서는 160℃, 1900rpm에서는 220℃로 엔진 속도가 상승함에 따라 배기 온도가 상승한다. 그래프를 보면 미세하게 D1을 닫은 경우에 미미한 온도 상승이 이루어지고 이후에는 닫지 않은 경우의 온도로 떨어지는 경향을 보인다. 결과적으로 개도율 10%의 댐퍼를 하나씩 닫는 경우와 3개를 동시에 닫는 경우 모두 배기 온도에 큰 영향을 주지 않는다.

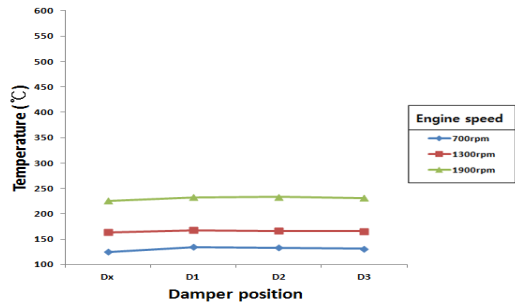


Figure 11: Exhaust gas temperature with damper position variation

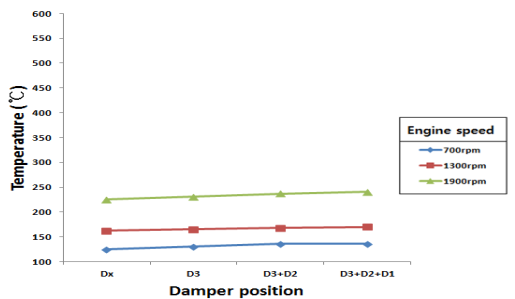


Figure 12: Exhaust gas temperature with damper combination variation

3.3 배기 배출물

3.3.1 엔진 속도별 개도를 감소에 따른 배기 배출물

Figure 13는 배기 배출물을 나타는 그래프로 (a)는 일산화탄소 배출량을 나타낸다. 일산화탄소는 연료가 불완전연소를 하는 경우 생성되는 배기 배출물로서 700rpm과 1300rpm에서는 실린더 내부로 들어오는 공기량이 충분하고, 개도율이 낮아짐에 따른 배압상승이 크지 않기 때문에 큰 변화를 보이지 않는다. (b)는 질소산화물의 변화를 나타내는 그래프이다. 700rpm에서는 개도율이 증가하면서 질소산화물 배출이 감소되는데 이는 잔류가스 영향으로 판단된다. 1900rpm에서는 EGR효과와 반대로 질소산화물이 증가된다. 이는 증가된 고온의 잔류가스가 연소온도를 더욱 증가시키기 때문인 것으로 판단된다.[8] (c)의 스모크는 질소산화물과 상반되는(Trade-off) 관계를 가지고 있어[9] 700rpm에서 개도율이 적어짐에 따라 많이 생성된다. 그러나 1300rpm에서는 큰 변화가 없고 1900rpm에서는 700rpm와 비교하면 크게 증가되지 않는다. 이는 1900rpm에서 고온의 잔류 가스가 연소특성을 향상

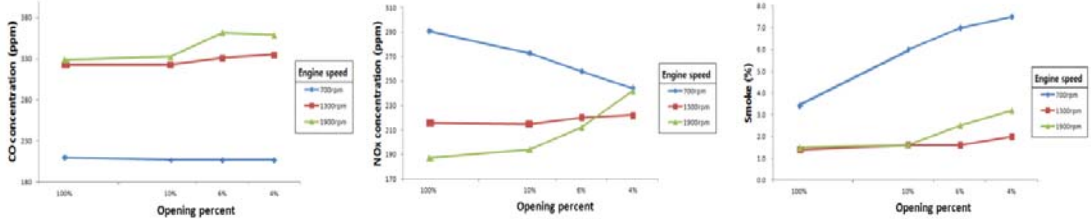
시킨 결과로 사료된다.

3.3.2 엔진 부하별 개도를 감소에 따른 배기 배출물

Figure 14의 (a)는 일산화탄소 배출량으로 고부하에서 매우 많은 양이 생성된다. 이는 부하가 높아지면 연료 공급이 많아지고 많은 연료를 연소시킬 산소가 필요하다. 그러나 개도율이 작아지면 배기 압력이 상승하여 내부에 배기가스가 잔류되고 잔류되는 배기가스의 양만큼 흡기밸브로 들어가는 공기의 양이 줄어들게 되어 불완전 연소가 증가되기 때문으로 사료된다. (b)는 질소산화물로 개도율에 따른 차이는 적다. 이는 잔류가스에 의한 불완전 연소와 고온의 잔류가스가 상호작용하여 유사한 연소온도를 나타내기 때문으로 사료된다. (c)는 스모크 그래프로 (a)의 일산화탄소의 배출과 비슷한 경향을 나타낸다.

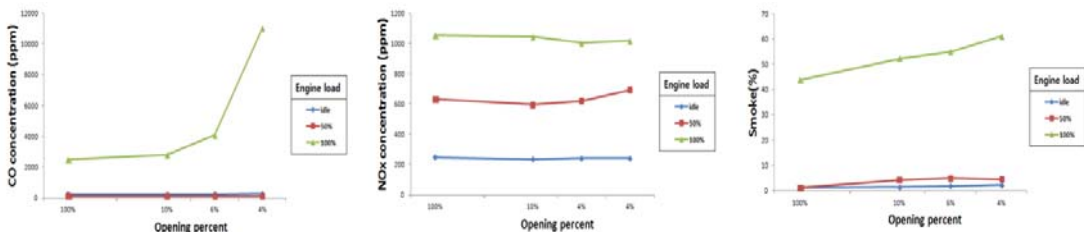
3.4 연료소비율

Figure 15는 연료소모율의 변화를 나타낸다. 배압 상승에 의한 영향은 1300rpm에서 부분적으로



(a) CO concentration (b) NOx concentration (c) Smoke

Figure 13: Exhaust gas concentrations with engine speed variation



(a) CO concentration (b) NOx concentration (c) Smoke

Figure 14: Exhaust gas concentrations with engine load variation

증가하거나 감소하나 전반적으로는 연료소비율에 미치는 영향은 크지 않다[10].

부하에 따른 연료 소모율은 Figure 16과 같은 변화를 나타낸다. 무부하에서 연료소모율이 더 크며 구간별로 연료소비율이 증가하거나 감소한다. 부하 100%에서 개도율 10%까지는 감소, 10%이하는 증가하는 것을 보면 적정 배기 압력 이상에서는 연료 소모율이 증가함을 알 수 있다. 중부하에서는 개도율 10% 이하부터 연료소모율이 감소하고 고부하에서는 개도율이 감소함에 따라 증가하는 경향을 보인다.

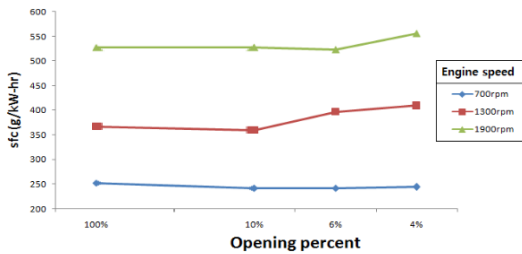


Figure 15: Specific fuel consumptions with engine speed variation

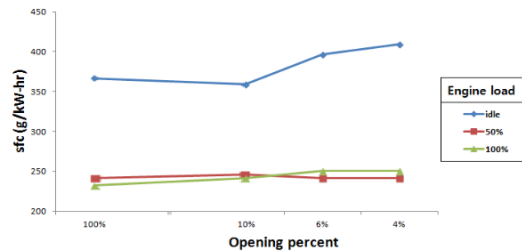


Figure 16: Specific fuel consumptions with engine load variation

4. 결 론

배기출구 개도율이 배기압력과 온도 및 엔진 성능에 미치는 영향을 분석한 본 연구를 요약하면 다음과 같다.

1. 개도율이 배기압력에 미치는 영향: 개도율 10%까지는 배기압력의 증가가 2 kPa 이내 이지만, 개도율을 4%로 감소시키면 48 kPa로 매우 크게 증

가된다.

2. 댐퍼 위치가 배기압력에 미치는 영향: 엔진속도가 낮은 경우에는 댐퍼의 위치가 배기 메니폴더에 가깝게 위치한 경우에 압력이 크게 증가되었으며 엔진속도가 높은 경우는 댐퍼의 위치가 멀리 있는 경우에 크게 증가되었다.

3. 댐퍼 중복설치가 배기압력에 미치는 영향: 댐퍼를 중복하여 설치하는 경우에는 댐퍼의 설치 개수에 비례하여 압력이 증가되었다.

4. 개도율이 배기가스에 미치는 영향: 개도율 10%인 경우 최대부하에서 일산화탄소와 스모크가 다소 증가되었으며 질소산화물은 저감되었다. 개도율이 6%로 감소되면 최대부하에서 일산화탄소와 스모크가 다소 과도하게 증가되나 질소산화물은 전반적으로 감소되었다. 개도율 4%가 되면 일산화탄소와 스모크가 최대부하에서 매우 증가되었다.

5. 개도율이 연료소비율에 미치는 영향: 개도율이 10%인 경우 연료소비율이 전반적으로 소폭 감소되었으며 6%에서는 10%와 비슷하였고 개도율이 4%에서는 약간 증가되었다. 결과적으로 개도율 감소가 연료소비율에 큰 영향을 미치지 않았다.

이상의 결과를 종합하면, 배기관에 어떠한 장치가 부착되어 기존 배기 출구 면적이 10%와 6%로 감소되는 경우, 최대 부하에서 배기 압력과 일산화탄소 및 스모크 배출량이 소량 증가하지만 엔진 성능에 큰 영향은 미치지 않았다. 그러나 배기관이 4%로 과도하게 감소하게 되는 경우 최대 부하에서 일산화탄소가 매우 증가하고 배기 압력도 허용 배압의 3배 이상 높아진다.

후 기

본 논문은 국토해양부 소관 해양안전 및 해양교통시설 기술개발 사업 중에 녹색선박 TCS시스템 구축 과제와 산업통상자원부 청정생산기반 전문기술개발사업(과제번호: 10044510)의 지원으로 연구 되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

[1] Honghyel Lee and Ilo Lee, "Feasibility study

- for application of waste heat recovery system on the marine ship”, The Korea Society of Marine Engineering, vol. 1, no. 1, p. 109, 2012.
- [2] P. Bowles and J. Batteh, “Multi-cylinder engine model using modelica”, Society of Automotive Engineers, Powertrain & Fluid Systems Conference & Exhibition, 2003.
- [3] S. C. Choi, “Pressure variations in intake and exhaust manifold of a single cylinder engine”, The Korean Society of Mechanical Engineers, vol. 2, no. 33, pp.775-780, 2003.
- [4] J. D. Lee, “A study on the black smoke and exhaust temperature in the diesel engine”, The Korean Society of Automotive Engineers, Branch conference, vol. 4, pp. 119-123, 2004.
- [5] Y. S. Cho, “An experimental study on variations of exhaust gas temperature and concentration with synthetic gas combustion in exhaust manifold”, Transactions of Korean Society of Automotive Engineers, vol. 16, no. 4, pp.55-62. 2008.
- [6] S. Y. Choi, “The effect of muffler back pressure on the engine combustion characteristics”, The Korean Society of Automotive Engineers, vol. 1, no. 22, pp. 141-147, 2004.
- [7] S. M. Son, “The effect of exhaust pipe shape on the back pressure characteristics and engine performance”, The Korean Society of Automotive Engineers, vol. 5, no. 22, pp. 77-82, 2005.
- [8] S. H. Jang, “The effect of EGR on exhaust emissions in a direct injection diesel engine”, The Korean Society for Power System Engineering, vol. 8, no. 1, pp. 18-23, 2004.
- [9] J. W. Lee, “A study of the measurements of the residual gas and its effect on the combustion characteristics as function of valve timing in a SI engine”, The Korean Society of Automotive Engineers, vol. 3, no. 5, pp. 126-133, 2000.
- [10] S. M. Noh, “The study of the effect of EGR rate and temperature on NOx and PM reduction in a direct-injection diesel engine”, The Korean Society of Automotive Engineers, vol. 1, no. 78, pp. 418-424, 2001.