

흡기조성 변화에 따른 디젤 기관의 연소 특성 변화

김 세 원* · 임 재 문**

A Study on the Combustion Characteristics of Diesel Engine by the Change of the Intake Air Composition

S. W. Kim · J. M. Lim

Key words : Diesel engine(디젤 기관), Oxygen(산소), Inert gas(불활성 가스), Specific heat ratio(비열비), Ignition delay(점화 지연), Heat release rate(열 발생속도)

Abstract

Intake gases other than air, which is composed of oxygen, nitrogen, carbon dioxide, and argon, are used to study their effects on the performance of the diesel engine experimentally. The engine is operated at constant speed and fixed fuel injection timing, and cylinder pressure and heat release rate are measured at various intake gas compositions. The results show that increase of oxygen concentration improves the performance of the engine generally. The adverse effect is observed when the oxygen concentration is increased over the critical oxygen concentration of this test, mainly because of the over - shortened ignition delay. Increase of carbon dioxide concentration degrades the performance of the engine, mainly due to the lower specific heat ratio of carbon dioxide. Adding argon gas to the intake gas improves the overall performance. Finally, it is found that two most influencing factors affecting the performance of the diesel engine in this study are ignition delay and specific heat ratio of the intake gas.

1. 서 론

최근, 수중에서의 해저 탐사 등과 같이 공기가 없는 곳에 대한 과학적 관심이 증대함에 따라, 축전지와 같은 재래식 에너지원의 단점인 제한된 활동 시간을 극복하기 위한 노력의 일환으로, 연료

전지(Fuel Cell), 스텔링 기관(Stirling Engine) 및 디젤 기관 등을 이용하여 외기와 무관하게 작동될 수 있는 추진 시스템의 개발에 관한 연구가 선진국을 중심으로 활발히 진행되고 있다. 따라서, 디젤기관의 흡기가 공기가 아닌 산소, 이산화 탄소, 질소 및 알곤 등의 혼합가스로 구성되었을 때 기

* 정희원, 국방과학연구소
** 정희원, 국방과학연구소

관의 성능 변화에 대한 상세한 연구는 위에서 언급한 시스템의 개발에 필수적인 분야이다.

Reader et al.¹⁾은 디젤 및 스테어링 기관을 이용한 추진 장치의 전반적인 구성 및 특성에 대해 분석하였고, Puttick²⁾과 Fowler³⁾는 의사 공기로 구동되는 디젤 기관의 산소 농도 증가시 영향 및 제어 방안에 대하여 연구하였다. Watson et al.⁴⁾는 공기 중 산소 농도를 30%까지 증가시켰을 때 기관의 열효율 및 배기 중의 NOx 농도 등에 미치는 영향에 대해 분석하였다. Asada and Nagai⁵⁾는 흡기 중의 이산화 탄소 농도가 증가함에 따라 출력이 감소함을 밝혔으며, 산소 농도가 증가함에 따라 실린더 최고 압력 및 열효율은 상승함을 밝혔다.

본 연구에서는 흡기 중 산소, 이산화 탄소 및 알곤 각각의 농도 변화가 디젤기관의 연소특성에 미치는 영향에 대해 실린더 압력과 열 발생 속도(Heat Release Rate)의 측정을 통해 실험적으로 고찰하였다.

2. 실험 장치 및 방법

본 실험에 적용한 디젤기관은 직접 분사식 4행정 디젤 기관으로 제원은 Table 1과 같으며, 연료는 저유황 디젤유를 사용하였다. 본 연구에서는 기관의 속도를 일정하게 유지한 상태에서 흡기 조성 변화에 따른 기관의 성능 변화에 대해 고찰하였으며, 실린더 내부 압력 및 연료 소모량, 흡기 및 배기의 유량, 온도, 압력 및 조성을 계측하였으며, 실험장치 및 계측 장비의 개략도는 Fig. 1에 나타냈다.

흡기 및 배기의 조성은 가스 크로마토 그래프(Gas Chromatograph, HITACHI Model G-3000)을 이용하여 측정하였고, 산소 농도는 갈바

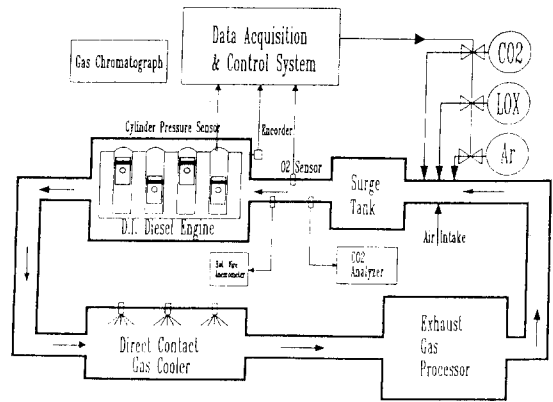


Fig. 1 Block Diagram of Experimental Apparatus, Data Acquisition and Control System.

니(Galvani)식 산소 센서를 이용 하였다. 이산화탄소 농도는 NDIR형 CO₂ 분석기(CO₂ Analyzer, Rotork Model 401)를 이용 하여 분석하였으며, 실린더 내부 압력은 압전형 압력 센서(Piezoelectric Pressure Transducer, Kistler Model 5011)를 사용하여 측정하였다.

흡기중 산소의 농도는 산소 센서, A/D 변환기(Data Translation DT2835), 및 컴퓨터로 구성된 데이터 수집 장치(Data Acquisition System)에서 전동 밸브(Motor Valve)의 조절을 통해 정확한 농도에 해당하는 양의 산소를 공급하며, 알곤 가스의 공급은 전자식 유량계 및 전동 밸브를 이용하여 원하는 농도로 공급 되도록 하였다. 따라서, 본 실험에서 모든 데이터는 데이터 수집 및 제어장치를 통해 컴퓨터에 자동적으로 수집되었으며, 산소 및 알곤 가스의 농도도 원하는 농도에 유지되도록 구성되었다. 본 실험에서 계측된 데이터는 반복성 및 신뢰성을 위해 10회 이상 동일 조건에서 측정하여 평균값을 취하였다.

열 발생 속도 $dQ/d\theta$ 는 측정된 크랭크 각도당 실린더 내부 압력 $P(\theta)$ 데이터로 부터 에너지 보존 법칙 및 이상 기체 방정식을 적용하여 다음과 같은 수식으로 표현한 후 계산된다. 열역학 제1법칙으로부터 다음 식이 성립된다.

$$dQ - dQ_c + h_f dm_f = d(mC_v T) + PdV \quad (1)$$

위식에서, Q , Q_c , $h_f dm_f$, $mC_v T$ 는 각각 연소열,

Table 1 Engine Specification

Type	4 - Cycle, Direct Injection
Combustion Chamber	Bowl in Piston
No. of Cylinder	4
Bore(mm)	102.0
Stroke(mm)	100.0
Swept Volume(cc)	3264
Compression Ratio	17.0
Injection Time(°)	15° BTDC

연소실 내 손실 열량, 연료의 엔탈피(Sensible enthalpy) 및 실린더 내 가스의 내부 에너지를 나타낸다. 위 식에서 질량 손실은 무시하였다. 또한 $h_f dm_f$ 항은 다른 항에 비해 작은 값을 가지기 때문에 무시한다. 위 식에 이상 기체 방정식 $PV = mRT$ 를 적용하여 정리하면 다음 식이 구해진다.

$$\frac{dQ}{d\theta} = \frac{1}{k-1} \left(kP \frac{dV}{d\theta} + V \frac{dP}{d\theta} \right) - \frac{PV}{(k-1)^2} \frac{dk}{d\theta} + \frac{dQ_c}{d\theta} \quad (2)$$

여기서, k , θ , R 은 각각, 비열비, 크랭크 각도 및 기체 상수를 표시한다. 위 식에 적용한 가정들은 다음과 같다. 실린더 내 온도 분포는 균일하고, 실린더로부터 질량 손실은 무시하고, 실린더 내 가스는 이상기체 법칙을 따르며, 분사된 연료의 엔탈피는 무시하였다. 비열비의 계산은 JANAF 데이터⁶⁾로부터 산소, 이산화탄소, 질소, 알콘 각각의 온도 변화에 비열비 변화를 구하였다. 또한, 실린더 내의 평균 가스 온도는 이상 기체 방정식에서 $T = PV/mR$ 를 적용하여 구하였다. 또한 연소실 내 손실 열량 Q_c 는 Annand⁹⁾의 식을 이용하여 다음 식과 같이 구하였다.

$$\frac{dQ_c}{d\theta} = C_1 \frac{k_t}{B} Re^{C_2} (T - T_w) + C_3 (T^4 - T_w^4)$$

여기서, Re , k_t , B , T_w 는 레이놀즈 수(Reynolds Number), 열 전도 계수, 피스톤 직경 및 실린더 벽면 온도를 표시하고, C_1 , C_2 , C_3 는 상수값을 나타낸다.

실험은 기관 회전수를 1800rpm의 정속도로 운전한 상태에서 흡기 각 성분의 농도를 변화시키며 수행하였으며, 크랭크 각도 당 실린더 내부 압력은 기관이 정상 상태에 충분히 도달한 후 1 회당 3 사이클을 측정하였고, 위 실험을 10회 반복한 후 평균값을 취하였다. 열 발생 속도 $dQ/d\theta$ 는 $P - \theta$ 데이터를 위 식에 대입하여 구하였다.

3. 실험결과 및 고찰

공기 운전시 열 발생 속도 $dQ/d\theta$ 와 실린더 내의 압력 변화 $P(\theta)$ 는 Fig. 2에 나타난바와 같다. 연료

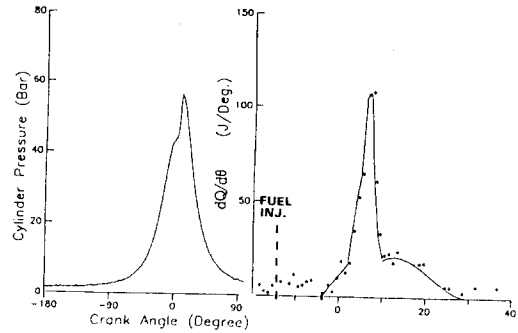


Fig. 2 Cylinder Pressure and Rate of Heat Release at Air Intake Condition.

분사 시작점과 연소 개시점 사이의 시간, 즉 점화 지연(Ignition Delay)은 약 11℃A임을 알 수 있으며, 실린더 최고 압력(Maximum Cylinder Pressure, P_{max})은 ATDC 9℃A에서 56.5bar임을 알 수 있다.

3. 1 산소 농도의 영향

흡기의 조성이 산소와 질소로 구성되며 산소 농도를 21%에서 26%까지 변화시켰을 때 실린더 내의 압력 변화 $P(\theta)$ 는 Fig. 3에 나타난 바와 같다. 흡기중 산소의 농도가 24%까지 증가하였을 때 P_{max} 값은 증가하고, 연소 최고 압력에 상응하는 크랭크 각 θ_{max} 는 전진함을 알 수 있다. 즉, 산소 농도가 약 24%일 때는 공기 운전 시와 비교하여 P_{max}

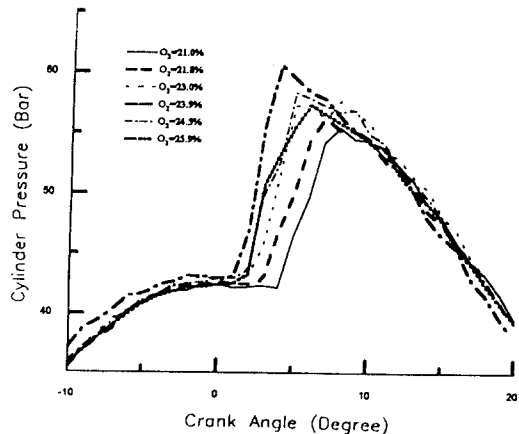


Fig. 3 Effects of O₂ Concentration on Cylinder Pressure(Balance N₂)

는 5.5 bar 증가하며, θ_{max} 는 5°C/A 전진함을 알 수 있다. 산소 농도가 24% 이상일 때는 반대의 경향을 보여준다. 즉, 산소 농도가 증가함에 따라 P_{max} 는 감소하고, θ_{max} 는 후퇴함을 알 수 있다.

Fig. 4는 열 발생 속도의 변화를 나타낸 것으로 산소 농도가 증가할수록 점화지연 기간이 감소함을 알 수 있고, 최대 열 발생 속도 $(dQ/d\theta)_{max}$ 는 산소 농도가 24%까지 증가할 때는 점점 증가하다가 24% 이상에서는 점점 감소함을 알 수 있다. 즉, $(dQ/d\theta)_{max}$ 은 산소 농도가 24%일때 170 J/°C/A까지 증가하다가 25.9%일때 122 J/°C/A로 감소함을 알 수 있다. 또한, 연료분사 개시점 부터 연소 시작점까지의 시간, 즉 점화 지연 기간은 산소 농도의 증가에 따라 점차 단축됨을 알 수 있다.

종합적으로, 산소 농도가 24%까지는 기관의 산소 농도가 증가됨에 따라 기관의 성능은 향상되나, 그 이상 증가 시는 오히려 기관의 성능은 저하됨을 알 수 있다.

이러한 산소 농도 변화에 따른 기관 특성 변화의 결과는 다음과 같이 설명될 수 있다. 산소 농도의 증가는 연료의 조기 착화를 유도함으로써, 점화되는 순간에는 연료가 많이 침투하지 못하여 적은 체적의 착화된 영역을 차지함으로써, 디젤 기관 특유의 연소 초기의 급격한 예 혼합 연소 부분이 상대적으로 감소함으로써 압력 상승율이 둔화되며, 그 후 분사된 연료는 산소 과잉 상태에서 점차적인 확산 연소 현상을 나타내게 되기 때문으로 판단된다. 즉, 산소 농도가 증가할 수록 연료의 연소성이 향상되어 기관의 성능은 향상되나 한계 농도 이상 증

가 되면 과도하게 단축된 점화 지연에 의해 기관의 성능은 저하됨을 알 수 있으며, 본 시험 조건에서는 산소 농도가 약 24%일때 기관의 성능이 최고로 향상됨이 밝혀졌다.

3. 2 불활성 가스 농도의 영향

산소, 이산화탄소 및 질소로 구성된 흡기 중 산소의 농도를 21%로 유지하고 이산화 탄소의 농도를 33%까지 증가시켰을때 실린더 내 압력 변화 $P(\theta)$ 는 Fig. 5에 나타난 바와 같다. 흡기 중 이산화 탄소 농도가 증가함에 따라 P_{max} 는 감소하고, θ_{max} 는 후퇴하는 경향이 나타남을 알 수 있다. 흡기 중 이산화 탄소의 농도가 33% 일 때의 $P(\theta)$ 의 변화를 보면 과도한 점화 지연과 흡기의 낮은 평균 비열비로 인한 압축 최고 온도 및 압력의 저하로 연소 최고압력 P_{max} 가 30.1bar의 값을 취하여 크랭크 각

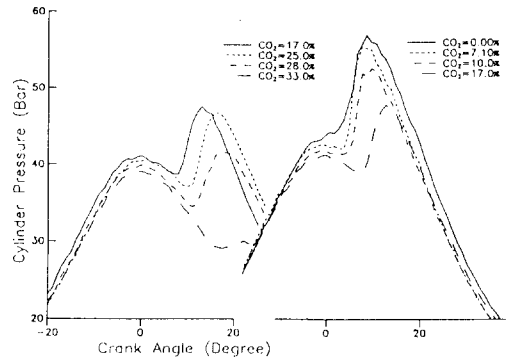


Fig. 5 Effects of CO₂ Concentration on Cylinder Pressure(O₂=21%, Balance N₂)

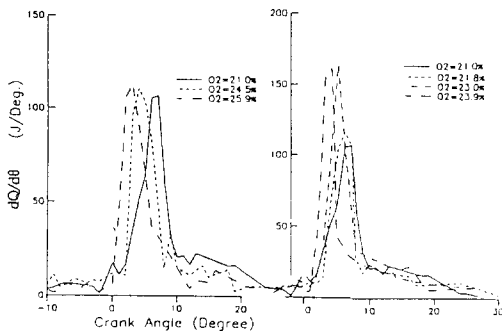


Fig. 4 Effects of O₂ Concentration on Rate of Heat Release(Balance N₂)

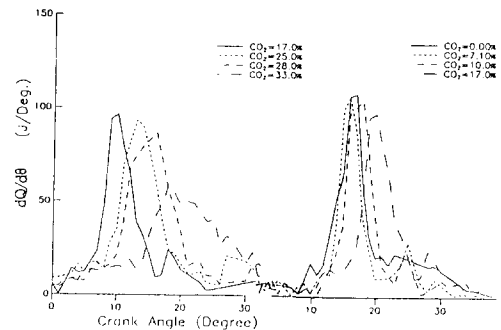


Fig. 6 Effects of CO₂ Concentration on Rate of Heat Release(O₂=21%, Balance N₂)

이 TDC일 때의 압력 38bar 보다 낮은 극단적인 현상이 나타남을 볼 수 있다. 열 발생 속도 $dQ/d\theta$ 의 변화는 Fig. 6에 나타난 바와 같이 이산화 탄소 농도가 증가할수록 $(dQ/d\theta)_{max}$ 는 점차 감소하고 점화 지연 기간은 점차 증가함을 알 수 있다. 상온에서 이산화탄소의 비열비는 1.289로서 산소나 질소의 1.40보다 훨씬 낮은 값을 가진다. 따라서 흡기중 이산화 탄소의 농도가 증가할수록 흡기의 평균 비열비는 점차 감소하며, 압축 최고 온도 및 최고 압력을 저하시킨다. 또한, 이산화 탄소는 고온에서 다른 가스에 비해 월등히 높은 정적 비열값을 가지므로 결과적으로 압축 최고 온도 및 압력을 저하시킨다. 이러한 현상은 분사된 연료의 착화성 및 연소성을 저하시켜 그 결과 점화 지연 기간이 증가하고 전반적인 기관의 성능 저하를 초래하게 된다. 따라서, 연소에 의해 발생된 이산화 탄소를 흡기로 재순환시켜 이용하는 시스템에서는 이산화 탄소의 낮은 비열비로 인한 연료의 착화성 및 연소성의 저하를 방지하는 대책으로써 헬륨이나 알곤 등과 같은 높은 비열비 값을 가지는 불활성 가스를 소량 첨가하거나 흡기의 온도를 높이는 방법 등의 적용이 필요하다.

산소(21%), 이산화탄소(17%), 질소, 및 알곤으로 구성된 흡기 조건에서, 알곤의 농도를 10%까지 증가시켰을 때 P_{max} 및 $dQ/d\theta$ 의 변화를 Fig. 7에 나타내었다. Fig. 7에 나타난 바와 같이 알곤 농도가 증가함에 따라 P_{max} 는 증가하며 θ_{max} 는 전

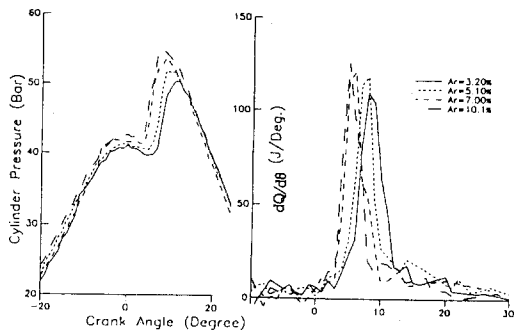


Fig. 7 Effects of Ar Concentration on Cylinder Pressure and Rate of Heat Release($O_2=21\%$, $CO_2=17\%$, Balance N_2)

진하는 경향을 나타내었다. 알곤이 10% 첨가되었을 때 P_{max} 는 54.8 bar로서 알곤이 첨가되지 않았을 때와 비교하여 약 15%의 상승을 가져왔으며, θ_{max} 는 5°C 전진하였음을 알 수 있다. 열 발생 속도 $dQ/d\theta$ 의 변화를 고찰하면, 알곤의 농도가 증가할수록 $(dQ/d\theta)_{max}$ 은 증가하며, 점화 지연은 감소함을 알 수 있다. 알곤 농도의 변화에 대한 위의 결과는 다음과 같이 분석된다. 알곤은 타 가스에 비해 높은 비열비(1.667)를 가진 가스로서, 알곤의 농도가 증가됨에 따라 흡기의 평균 비열비를 상승시켜 낮은 비열비의 이산화 탄소가 흡기에 다량 포함됨에 따른 비열비의 저하를 보상시켜 기관의 성능을 향상 시키는 역할을 한 것으로 판단된다.

4. 결 론

산소 및 불활성 가스 각각의 농도 변화가 기관의 성능에 미치는 영향을 실험적으로 분석한 결과로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 흡기 중 산소의 농도가 증가함에 따라, 실린더 내 최고 압력 및 최고 열 발생속도는 증가하고, 점화 지연은 단축되어 기관의 성능은 향상된다. 그러나, 산소 농도가 적정치 이상 증가하면 과도하게 단축된 점화 지연으로 인해 위와 상반된 결과를 보인다.

(2) 흡기 중 이산화 탄소의 농도가 증가됨에 따라 이산화 탄소의 낮은 비열비 및 높은 정적 비열로 인한 압축 최고 온도의 저하로 점화 지연은 길어지고 실린더 내 최고 압력 및 최고 열 발생속도는 감소하여, 기관의 성능은 저하되는 결과를 보이며, 흡기 중 알곤의 농도가 증가되었을 때는 알곤의 높은 비열비로 혼합 가스의 평균 비열비를 상승시켜 기관의 성능을 향상 시킨다.

(3) 본 실험 조건에서는 점화 지연과 흡기의 평균 비열비가 기관의 성능을 결정하는 중요한 인자들이 밝혀졌으며, 추후 기관의 속도 및 부하 변화 등의 조건에서의 성능 분석이 추가적으로 진행되어야 할 것으로 판단된다.

참고문헌

- 1) G. T. Reader, G. Walker, J. G. Hawley, "Closed Cycle Diesel and Stirling Engine Development for Underwater Vehicles," In 'tl Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Volume 1, 1990.
- 2) J.R. Puttick, "Recycle Diesel Underwater Powerplants", SAE paper 710827, 1971.
- 3) A. Fowler. "Development of Control Systems for an Underwater Power Source", paper 252, IEE Conference, "Control ' 85", 1985.
- 4) H. Watson, E. Milkins, and G. Rigby, "A New Look at Oxygen Enrichment 1) The Diesel Engine", SAE paper 900344, 1990.
- 5) T. Asada and M. Nagai, "Investigations on Recycle and Closed - Cycle Diesel Engines", SAE paper 800964, 1980.
- 6) JANAF Thermochemical Tables, 2nd ed., NSRDS - NB537, U. S. National Bureau of Standards, 1971.
- 7) W. J. D. Annand, "Heat Transfer in the Cylinders of Reciprocating Internal Combustion Engines", Proc. Instn. Mech. Engre., Vol. 177, pp. 973 - 996, 1963.