

혼합기 오존 첨가에 따른 SI기관의 배기배출물 특성 Exhaust Emissions Characteristics on the SI Engine according to the Air-Fuel Mixture with Ozone

이병호·이중섭·이용훈·이찬규·정효민·정한식

B. H. Lee, C. S. Yi, Y. H. Lee, C. K. Lee, H. M. Jeong and H. S. Chung

Key Words : Combustion(연소), Exhaust mission(배기 배출물), Ozone(오존)

Abstract : In a conventional and lean operating engine, the state of mixture is very important in the combustion and emission characteristics. Lean operation is known to decrease the formation while maintaining a good fuel economy, but the unstable operation due to misfire and erratic combustion prevents engines from being operated at very lean mixtures, so both combustion rates and exhaust emission formation need to be satisfied comparably. In this study, it is designed and experimented the modified engine, and analyzed the combustion and exhaust emission according to the change of engine speed and with adding ozone. The conclusions were drawn out and enumerated as follows. 1. At the experimental result of automobile diesel engine, it has been verified that the formation of particulate matter(PM) gas is able to be lower with the addition of optimum quantities of ozone. 2. Carbon monoxide(CO) was formed by the lack of oxygen and the thermal dissociation in the combustion process. Therefore, with the change of swirl valve's position and addition of oxygen and ozone, CO formation was decreased by the increasing of excessive O₂, but it was increased by the temperature of combustion gas growing higher. As a result of the two effects, CO formation was decreased in this study. 3. Hydrocarbon(HC) was formed by the lack of O₂, and the flow of mixture in cylinder. According to opening of the swirl valve and adding the oxygen and ozone, hydrocarbon gas was decreased by 20%, 9%, and 27.5%, respectively. 4. Nitric oxides(NO_x) was strongly affected by the combustion gas temperature. As a result of respectively experimental conditions, NO_x formation was increased about 20% due to (be the) high(er) combustion gas temperature.

1. 서 론

자동차의 공급이 수요를 앞서는 시점에서 세계의 독자적인 기업들은 소비자의 요구에 부응하고자 기술과 자본의 합병 및 인수 등을 통한 글로벌 마케팅을 기지화하고 있으며, 화석연료 사용량의 급격한 증가에 따른 환경문제, 유가급등 및 자원고갈에 대응하기 위하여 자동차 기술은 연비향상, 하이브리드 자동차 개발 및 배기가스 정화 기술 연구에 초점을 두고 있다. 연비 향상을 위하여 최근 관심을 모으고

있는 희박연소는, 1976년 Quader¹⁾의 희박 한계에 대한 연구를 시작으로 급속히 진전되어, Gomez 등²⁾과 Yamamoto 등³⁾이 그 적용 가능성을 제안하였으며, 희박연소시 정상 연소의 관건이 되는, 연소초기에 안정된 화염 핵의 형성 확률 및 속도를 향상시키기 위하여 플라즈마 제트 효과를 이용하는 방법으로, Kim 등⁴⁾은 그 실현성에 관한 연구를 발표하였다. 또한 Lee 등⁵⁾은 다수의 점화 플러그를 연소실 벽면에 삽입하여 여러 점화 위치에서 동시에 스파크를 일으킴으로서 점화 확률을 높이는 방법을 제안하였다. 또한 희박 혼합기의 연소를 개선하기 위한 방법으로서 연소실내 혼합기의 유동 제어, 연료의 분사시기 제어와 이에 따른 연소실 형상의 최적화 등에 대한 연구가 진행되고 있다⁶⁻¹⁰⁾. 최근 저연비와 고효율 향상을 위해 새롭게 개발된 연소 기술로서 실린더 내 가솔린 직접 분사(GDI : Gasoline

접수일 : 2006년 4월 27일, 채택확정 : 2006년 8월 23일
이병호(책임저자) : 오산대학 자동차기계열
E-mail : dreamlbh@osan.ac.kr Tel. 031-370-2655
이용훈, 이중섭 : 경상대학교 대학원
이찬규 : 거제대학 메카트로닉스
정효민, 정한식 : 경상대학교 기계항공공학부, 해양산업연구소

direct injection)기관이 있다. 이는 층상 급기 연소 방식을 개선한 연소기술로, 기존 가솔린 기관은 흡기포트에 연료를 분사하였으나, 이 연소방식은 실린더 내에 연료를 직접 분사하는 형식으로서 직립포트, 고압 스월 인젝터(Swirl injector) 등을 채택하고 있다. 이는 배기가스 방출 유해물질을 저감하기 위한 방법으로서, 종래의 연소가스 후처리 방법에 한계가 있으므로, 이를 극복하기 위한 선 처리 방법이라고 할 수 있다. 이와 같이 오염물질 저감과 저연비, 고효율을 위한 연구가 주류를 이루고 있다고 할 수 있으며, 이와 관련된 연소 성능을 향상시키기 위한 연구가 필요하다.

본 연구는 희박연소 가솔린기관에서 흡기 조성의 변화가 엔진연소 및 배기특성에 미치는 영향을 조사하고자 하며, 그 실험 기법으로는, 직류코로나 방전을 이용하는 산화력이 높은 오존발생장치를 설계 제작하고, 흡입관내 유로의 장착방식을 변화시키고, 기관실험 조건에 따라 매연 제거 특성 및 유전체 장벽 방전을 이용하여 생성된 오존과 산소를 기관의 흡입 혼합기에 부가 주입할 때 연소 및 배기가스에 미치는 영향을 실험적으로 규명하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험엔진 구성

본 연구에 사용된 기관은 희박연소 가솔린 기관으로서 그 제원은 Table 1과 같다.

Fig. 1에 기관 동력계 시스템의 전체 구성을 도시하였고, 제어부, 엔진동력계, 인터페이스, 시스템 관리의 4부분으로 나눌 수 있다. 제어부는 컴퓨터와 컨버터 카드로 구성되고, PC는 퍼지 비례제어기, 시스템의 운영을 관리하는 부분의 소프트웨어로 이루어지며, 컨버터 카드는 인터페이스로부터 관측된 파라미터를 읽어 들이고, 제어기로부터 출력되는 스로틀 개도 및 동력계 전류를 동력계의 스텝 모터 구동기와 동력계 구동기로 전송한다. 기관의 동력계부는 제어 출력인 전기적 신호를 기계적 동작으로 변환시키는 액추에이터와 엔진 동력계로 이루어진다. 스텝 모터 구동기는 전기적 신호로 스로틀의 각도를 변환시키고, 동력계 구동기는 토크를 생성한다. 기관에는 압력센서를 설치하여 연소가스 압력신호를 계측하였다. 동력계 실험용 기관의 크랭크축으로부터 유니버설 조인트를 통하여 동력계의 로터 축으로 동력이 전달된다. 동력계의 부하는 제작된 컨트

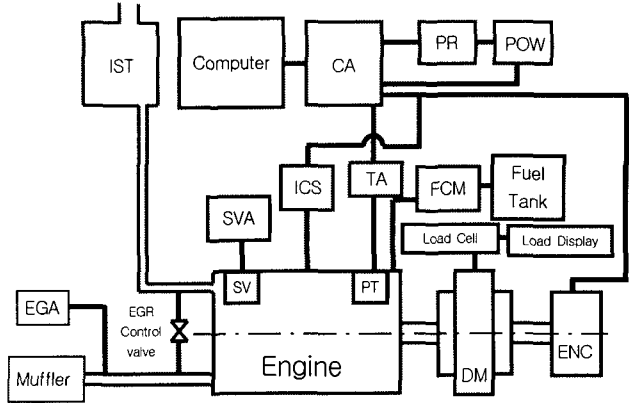


Fig. 1 Arrangement diagram of experimental set-up.

Table 1 Specification of tested engine

Item	Specifications
Engine type	4-Stroke, 4-Cylinder
Displacement (cc)	1,495
Bore × Stroke(mm)	75.5 × 83.5
Output (PS/rpm)	95/5,500

롤러를 제어할 수 있게 제어단자를 인출하여 연결할 수 있게 하였으며, 부하는 부하 측정용 암에 로드 셀을 설치하여 부하를 측정할 수 있게 하였다. 또 엔진회전수의 측정은 로터 축에 부착된 회전 슬롯의 펄스신호를 이용하여 디지털 회전자에 표시하고, F-V변환기를 컴퓨터에 연결하여 트리거 신호와 엔진회전수 데이터를 수집하였다.

2.2 실험방법

2.2.1 실험 조건 변화

기관의 연소와 배기 특성에 관해 실험을 수행하기 위하여 전자 제어식 스파크 점화 방식과 가솔린 연료의 사용 시 상용 희박연소 엔진을 개조하였으며 실험 방법으로는 실험기관을 냉각수 온도 85.5℃ 윤활유 온도 90.5℃로 충분히 난기 시킨 후 엔진의 운전인자를 Table 1과 같이 엔진회전수, 부하, 와류 조절 밸브(SCV : Swirl control valve) 및 스로틀 밸브 제어기(MTV : Manifold throttle)에서 스로틀 밸브의 개도를 변화시켜 가면서 각 운전조건에서 데이터를 취득하고 그에 따른 엔진운전조건에서 재순환하는 배기가스 양의 변화에 따른 연소특성 해석과 출력, 공연비 및 배기가스를 분석하였다.

점화시기는 회전수와 부하량에 따른 최대토크를 얻을 수 있도록 기관의 동력계에 하중을 주어 기관

회전수를 일정하게 유지하고 점화시기를 진각 시키면서 회전수의 변화를 확인하여 진각에 따라 회전수가 빨라지면 동력계의 하중을 높이고, 회전이 느려지면 동력계 하중을 줄여서 회전수를 일정하게 유지한다. 이와 같이 하여 최대회전력을 얻을 수 있는 점화시기를 찾아내어 최적점화시기(MBT : Miniun spark advance for best torque)를 결정하였다.

Table 2 Engine operating conditions

Condition	Variation
Engine speed (rpm)	1000, 1500, 2000, 2500
Swirl mode	full open, close
Ozone flow rate	0.28g/min
Spark timing (deg.)	MBT

2.2.2 연소특성 해석인자

연소특성 해석인자로는 연소압력과 배기가스 조성 및 연소의 변동성을 흡기관내의 스톱을 개도에 따라 선회 모드를 2.5~10초 까지 변화시키면서 실험하였으며, 기관회전수와 부하를 일정하게 유지한 상태에서 스월 모드에 따른 연소특성의 해석인자로써 실린더 내의 압력과 배기가스 조성 및 연속 사이클 압력데이터를 측정하였다. 냉각수는 공급식이 아닌 밀폐식으로 일정온도를 유지할 수 있도록 자동 온도 조절기와 냉각팬을 이용하였다. 그리고 기관 운전 인자들은 다음과 같이 선정하여 변화시켰다. 이론 혼합비 영역에서 희박연소 혼합비 영역으로 전이되는 히스테리시스(Hysteresis)를 기관제어장치의 제어를 통하여 기관의 운전 시 엔진 맵핑 표를 작성하였고, 따라서 이 영역에서 흡기관 내의 선회 밸브 레버가 작동되는 것을 확인하였다. 흡기 조성의 영향을 규명하기 위해서 산소 체적분율과 오존 유량에 대하여 실험을 수행하여 연소특성 및 배기 생성의 조성을 분석하였다.

3. 실험결과 및 고찰

연소실 내로 유입되는 흡기 조성 중에서 오존첨가 반응 시 점화 후 화염면에서의 산화반응이 용이해지고, 활성입자들의 생성도 증가되어, 그 결과 화염면의 이동이 가속될 것이다.⁽⁶⁾ 따라서 연소 압력과 압력 상승율, 질량 연소율 및 연소의 변동성을 해석하여, 흡기중의 오존의 첨가 및 스월비의 영향에 관

하여 규명하였다.

Fig. 2는 스월밸브의 개도와 실린더내 압력의 상관관계에 관한 것이다. x축은 크랭크 각도로, y축은 실린더 압력으로 두고 1000, 1500, 2000, 2500 rpm하에서 실험을 수행하였다. 밸브가 열려져 있을 경우에는 일반 엔진과 동등한 상태이고, 밸브가 닫혀져 있을 경우 희박연소 영역(Lean-burn region)으로 들어가게 된다. 이 선도를 살펴보면 스월밸브가 닫혀져서 희박연소 영역일 때 실린더 압력이 상승(약 5%)되고 있음을 알 수 있다. 이는 스월밸브의 개도가 연소에 영향을 미친다는 것을 알 수 있게 해준다.

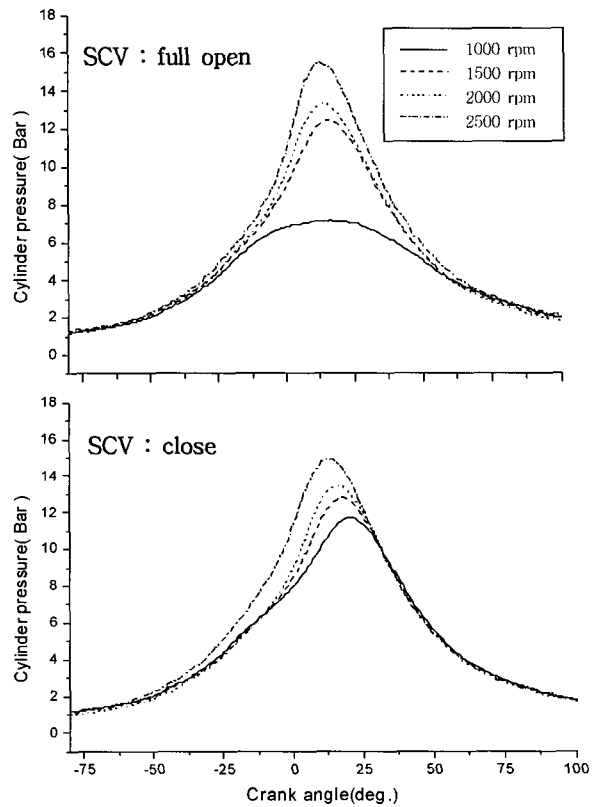


Fig. 2 Comparison of cylinder pressure for the engine speed under SCV.

Fig. 3는 스월밸브의 개도에 따라 실린더내로 유입된 혼합기의 연소기간을 질량연소율로 해석한 결과이다. 연소시작점은 점화시각으로부터 다소 지연기간이 있는데 이 기간을 점화지연기간으로 정의하고 이 기간은 질량연소율이 10%가 되는 지점까지로 설정하였다. 또, 질량연소율이 10%~90%까지의 범위를 주 연소기간으로 한다. 질량연소율이 90% 이상에서는 동력발생에 미치는 영향이 미소한 연소가 이루어지기 때문에 연소가 종료되는 것으로 고려하

였다. 스월밸브가 열려져 있는 상태일 때 닫혀져 (Lean-burn) 있는 상태일 때 보다 연소지연 시간이 더 짧아짐을 알 수 있다. 하지만 주 연소기간의 구간은 그 반대의 경향을 보이는데, 그 이유는 희박연소 제어 구간에서는 연소실에 공급되는 연료의 양이 적기 때문에 점화가 시작되기가 어렵다. 따라서 연소지연 구간이 길게 된다. 그렇지만 일단 연소가 시작되면 스월밸브에 의해서 연소실 안에 난류가 형성되어 비 스월 구간보다 화염의 전파 속도가 빨라지게 되어서 이런 결과가 나타나게 된다. 그 결과를 살펴보면 주 연소기간은 엔진회전수의 변화에 따라서 각각 10.7%, 10.5%, 17%, 11.2% 짧아졌다.

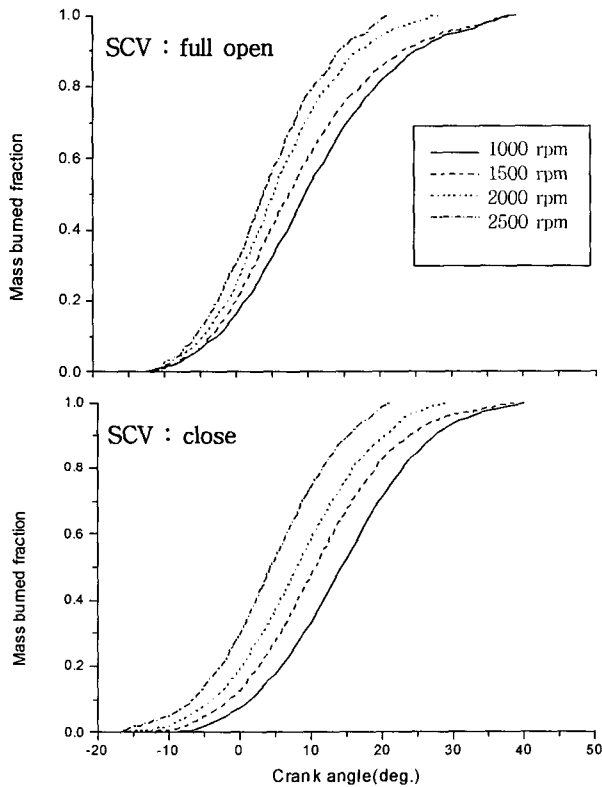


Fig.3 Comparison of mass burned fraction for the engine speed under SCV.

Fig. 4는 산화제인 산소와 오존이 미치는 영향을 분석한 것이다. 산화제가 첨가됨으로 연소지연과 주 연소기간의 구간이 모두 짧아지는 경향을 알 수 있고, 산화제의 영향을 비교해보면, 오존이 산소보다 더 좋은 결과를 얻음을 알 수 있다. 이는 오존이 발열반응 연소 시 33.92 kcal/kg정도 오존의 발열량이 산소보다 더 높기 때문이다. 결과를 살펴보면 오존을 첨가하였을 경우, C.D 구간이 12.3%, 13.6%, 11.2%, 그리고 10.1% 더 빨라짐을 알 수 있다.

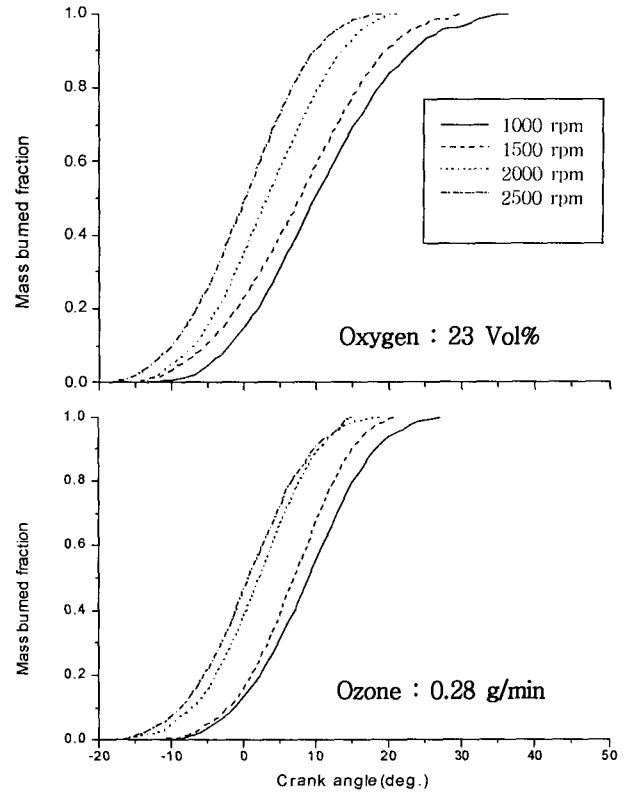


Fig. 4 Comparison of mass burned fraction for the engine speed with adding oxygen and ozone.

Fig. 5는 엔진 실험 시 기관회전수 변화에 따른, 일산화탄소 생성의 경향을 나타내고 있다. 일산화탄소는 산소 부족에 의한 불완전 연소와, 고온에서 이산화탄소의 열해리에 의해 생성된다. 그러나 이 중 이산화탄소가 해리되는 반응은 생성물의 체적을 감소시키기 때문에 고압이 될수록 해리되는 양은 감소하게 된다. 따라서 연소가스 온도 및 압력과 밀접한 관계가 있는 열해리의 영향은 감소하고 추가된 산소와 오존의 영향을 더욱 크게 받은 결과로써 일산화탄소는 감소하는 경향을 갖게 된다. 이러한 결과로서 산소와 오존을 첨가 하였을 때 일산화탄소의 생성은 감소하고 있다. 그러한 원인은 기관회전수의 증가에 따라, 연소실내의 혼합기의 유동이 균질 혼합되어 화염전파속도가 가속되어 연소반응속도를 빠르게 하기 때문인 것으로 판단된다. 그 결과 스월밸브가 닫혔을 때와 열렸을 때를 비교하면 일산화탄소의 배출량이 절반정도 감소하였고, 산소가 첨가되었을 경우 약 6%의 일산화탄소의 저감효과가 나타났다. 그리고 오존이 첨가되었을 경우 약 23%의 저감효과가 나타났는데, 산소나 오존이 첨가되었을 경우에는 여분의 산소로 인해 일산화탄소가 이산화탄소로 변화하기 때문이다. 즉, 일산화탄소

가스의 발생은 이산화탄소 가스의 발생과 반비례하고 희박연소 기관에서는 배기가스 생성량이 규정치 이하로 낮아짐을 확인하였다.

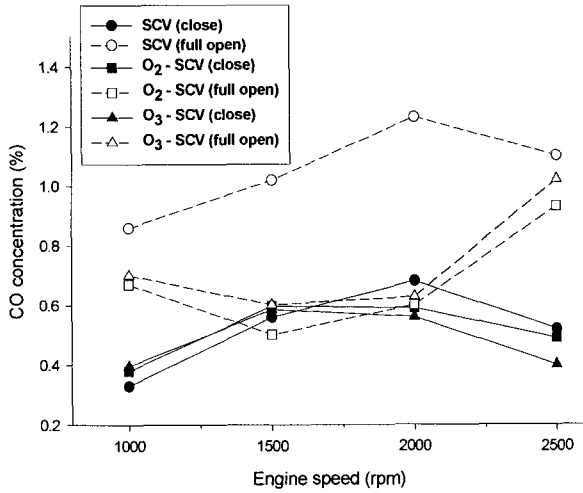


Fig. 5 Comparison of CO concentrations for engine speed.

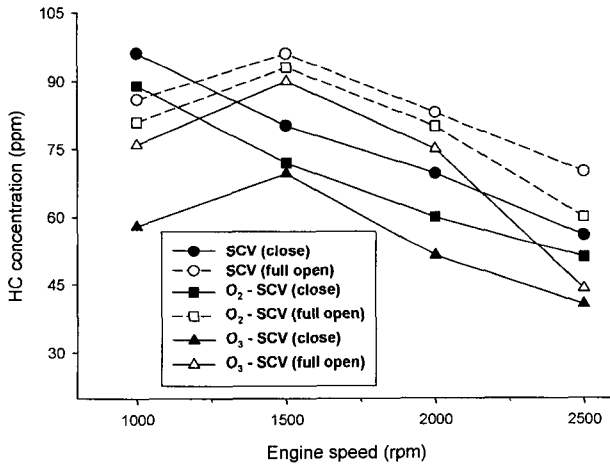


Fig. 6 Comparison of HC concentrations for engine speed.

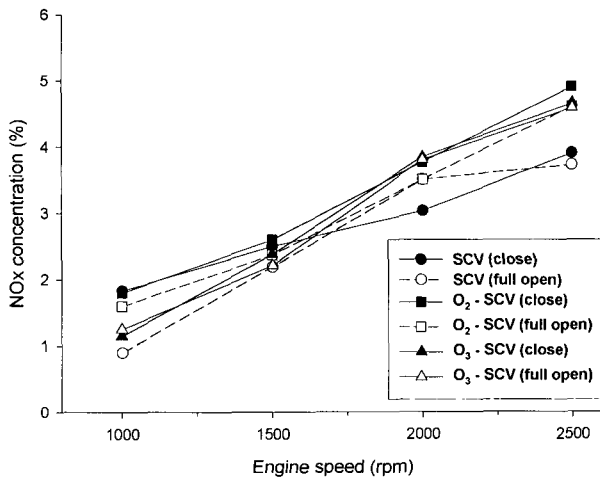


Fig.7 Comparison of NOx concentrations for engine speed.

Fig. 6은 기관회전수의 변화에 따른 탄화수소의 생성 경향을 나타낸 것으로 기관회전수 증가에 따라 탄화수소는 감소하였고, 일산화탄소와 정성적으로 같은경향을 보이고 있으며 스윙 모드가 비스윙 모드 보다 약 20%의 저감효과를 나타내고 있다. 그리고 산소가 첨가되었을 경우에는 약 9%의 저감효과가 있고, 오존이 첨가되었을 경우에는 27.5%의 저감효과를 보였다. 이는 연소실내의 혼합기의 유동에 기인한 것으로 공기와 연료가 균질 혼합되고 실린더 벽면의 냉각(Quenching)층이 낮아지는 것으로 판단된다.

Fig. 7은 기관 부하의 상태에서 기관회전수에 따른 배출가스 중의 질소 산화물의 농도를 나타낸 것이다. 이 선도에 나타난 바와 같이 질소 산화물 배출 농도는 스윙 모드상태에서 오히려 약4.6% 높게 발생하는 것을 확인할 수 있었다. 그리고 산소를 첨가하였을 경우 약 26%가 증가하였고, 오존 첨가의 경우에는 약 19%가 증가하였다.

4. 결 론

희박연소 방식의 문제점인 연소속도 지연과 연소 불안정을 개선시키기 위하여, 기관의 스윙밸브의 개도를 조정하고, 흡입되는 공기 중에 오존을 첨가하는 방법에 의한 이론 및 실험 해석의 결과를 요약하면 스윙밸브의 개폐 유무에 따라 연소실 압력에 영향을 미치게 되고, 이로 인해 연소지연 기간의 차가 발생하여 연소상태가 달라지게 된다. 이러한 원인에 기인하여 일산화탄소와 탄화수소의 배출량이 달라지는 결과를 보이고 있다. 또한 산화제인 오존이 첨가되었을 경우 발열량이 증가하여 연소지연이 단축되었지만 일산화탄소와 탄화수소의 경우 오히려 다소 높은 배출량을 보이고 있었다. 따라서 이러한 일련의 실험을 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 기관 연소특성으로서, 희박연소 영역에서 최고 압력은 약 5%가 증가되었고, 오존이 첨가됨에 따라 11%의 상승을 가져왔다. 그 상승분은 연소에 의한 체적 팽창의 결과로 연소속도가 향상되어 최대 압력 발생시기가 일반 엔진에 비해서 상사점으로 각각 2°, 5°이동하고 있는 것을 확인하였다.
- 2) 배기 배출물 생성 특성으로서, 일산화탄소의 생성은 연소 기간 중 산소 부족에 의한 것과 고온

에서의 열해리에 의해 생성된다. 따라서 스월 개도와 흡입공기 중에 오존이 첨가될수록 연소 가스 온도가 상승하고 연소실 압력도 상승되므로 일산화탄소의 생성은 감소의 경향을 보이고 있고, 그 감소되는 값은 각각 50%, 23%의 값을 나타내었다.

- 3) 미연탄화수소의 생성은 혼합기중의 산소 부족과 실린더 벽 근방의 소염 층에 의한 것이므로 스월 개도와 흡입공기 중에 오존이 첨가될수록 양호한 연소 분위기로 미연탄화수소의 생성이 각각 20%, 27.5%가 감소하는 경향을 보였다.
- 4) 질소 산화물은 스월 개도와 흡입공기 중에 오존이 첨가될수록 발생량이 증가하였는데, 그 상승율은 4.6~19%이다. 이는 연소실 내의 난류 형성으로 인한 연소촉진 효과와 온도 상승에 기인한 결과이다.

후 기

본 연구는 산업자원부 지역혁신인력양성사업과 경상대학교 NURI지원으로 이루어졌으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. A. A. Quader, 1976, "What Limits Lean Operation in Spark Ignition Engines-Flame Initiation or Propagation?", SAE 760760,
2. J. A. Harrington and R.C. Shishu, 1973, "A Single Cylinder Engine Study of the Effects of Fuel Type, Fuel Stoichiometry and Hydrogen to Carbon Ratio and CO, NO and HC Exhaust Emissions", SAE 730476.
3. C. R. Ferguson, 1986, "Internal Combustion Engines", John Wiley & Sons, chapter three
4. B.P. Ramesh, H.B. John and P.C. Christopher, 1996, "The effects of oxygenenriched intake air on FFV exhaust emissions using M85", SAE 961171.
5. R. Sekar, R. Poola, 1997, "Demonstration of Oxygen-Enriched Combustion System on a Light-Duty Vehicle to Reduce Cold-Start Emissions", Proce. of the 30th Int. sym. on Automotive Technology & Automation, pp.30

- 1 ~ 310,
6. J .B. Rosen, 1984, "Stability of the Ozone Flame Propagation", International Symposium on Combustion, the Combustion Institute, Volume 20, pp. 236 ~ 241
7. H. Gaedzke, 1984, "Addition reaction of Oxygen atoms at high pressure", International Symposium on Combustion, the Combustion Institute, Vol. 20, pp. 295 ~ 303,
8. F. J. Wright, 1985, "The Oxidation of soot by Oxygen(O)atoms", International Symposium on Combustion, the Combustion Institute, Vol.21 pp.1449-1460,
9. A. V. Grosse, 1985, "The Ozone to Oxygen Flame" International Symposium on Combustion, The Combustion Institute, vol.21, pp. 264-272.
10. D. H. Kim and J. U. Bae, 2003, "An Experimental Research on Performance and Emission Characteristics Direct-Injection Diesel Engines with Annular Two-stage combustion Chamber", Journal of the Korean Society for Power System Engineering, Vol.7, No. 4, pp.12-18