

〈논문〉 SAE NO. 2000-03-0114

스크러버형 EGR시스템 디젤기관의 피스톤 및 피스톤링 마모에 미치는 재순환 배기의 영향에 관한 연구

A Study on Effect of Recirculated Exhaust Gas upon Wears of Piston and Piston Rings in Diesel Engines with Scrubber EGR System

배명환*, 하정호**
Myung-whan Bae, Jung-ho Ha,

ABSTRACT

The effects of recirculated exhaust gas on the wears of piston and piston rings were investigated by the experiment with a two-cylinder, four cycle, indirect injection diesel engine operating at an engine load of 75% and an engine speed of 1600 rpm. For the purpose of comparison between the wear rates of two cylinders with and without EGR, the recirculated exhaust gas was sucked into one of two cylinders after the soot contents in exhaust emissions were removed by an intentionally designed cylinder-type scrubber equipped with 6 water injectors(A water injector has 144 nozzles of 1.0 mm diameter), while only the fresh air was inhaled into the other cylinder. These experiments were carried out on the fuel injection timing fixed at 15.3° BTDC. It was found that the wear rate of piston skirt with EGR increased a little bit, but the piston head diameter increased, rather than decreased, owing to soot adhesion and erosion wear, and especially larger with EGR, and that the wear rates of the top and second piston ring(compression ring) thickness with EGR were more than twice the wear rate of top ring in case of no EGR, but the wear rate of oil rings thickness without EGR increased greater than that with EGR.

주요기술용어 : EGR(Exhaust gas recirculation : 배기 재순환), Piston ring(피스톤 링), Diesel engine(디젤기관), Wear rate(마모율), Piston skirt(피스톤 스킨트), Piston head(피스톤 헤드), Soot adhesion(매연부착), Erosion wear(부식마모)

1. 서론

산성비, 오존층파괴, 지구온난화 등 지구규모에서의 대기환경 오염문제에 대한 관심이 나날이

* 회원, 경상대학교 수송기계공학과,
생산기술연구소

** 회원, 경상대학교 대학원

높아져 가고 있는데, 이러한 오염원의 대부분은 연소기관에서 배출되는 배기, 특히 디젤기관에서 배출되는 질소산화물, 매연(soot) 등이 거의 대부분을 차지하고 있다. 따라서 지구생존의 사활이 걸린 이러한 문제의 개선에 대한 사회적 요구가 강하게 제기되고 있어, 전세계적으로 관련 업체나 기관에서 많은 연구를 지속적으로 수행해 오

고 있다.¹⁾

디젤기관은 특유의 연소방식 때문에, 유해 배기 배출물이 다량으로 발생되고 있는데, 이전부터 이들의 저감을 위해 많은 노력을 해 온 결과, 많은 진전이 있어 왔다. 그러나 나날이 증가하는 차량의 대수 때문에, 총량면에서는 전혀 감소되고 있지 않아 배기규제가 더욱 강화되고 있는 것이 현실이다. 어떤 면에서는 존재의 기로에 서있는 것도 사실이지만, 현존의 열기관중, 아직까지는 디젤기관의 열효율이 가장 높기 때문에, 배기 배출물의 저감대책을 다각적으로 검토해 가면서, 이점을 최대한으로 활용하여야 할 것이다. 이러한 배기 배출물의 저감대책중, 배기 재순환(EGR)의 방법은 NO_x 배출물의 저감효과는 현저하게 뛰어나지만, 매연 등 다른 배출물의 증가를 초래할 뿐만 아니라, 재순환 배기에 의한 기관내부 마모증대를 가져오기 때문에, 실용화에는 많은 어려움이 뒤따르고 있다. 최근에는 이런 이유 때문에, 어느 한가지의 방법이 아닌 조합식 방법에 의하여 배기 배출물을 저감시키려는 연구들²⁾이 많이 이루어지고 있다.

저자들³⁾은 디젤기관에 EGR을 적용하여 배기 배출물 및 연료소비율에 미치는 영향을 실험에 의해 조사한 결과, EGR율을 증가시키면 높은 부하와 기관회전속도에서는 매연의 과다생성으로 기관을 가동시킬 수 없는 상태에 도달함을 알 수 있었다. 그 후, 재순환 배기중의 매연을 제거할 목적으로 스크러버형 매연제거장치⁴⁾를 통한 EGR 방식을 고안하여 실험을 한 결과, 재순환 배기중의 매연을 30 ~ 50% 정도 저감시킬 수는 있지만, 고부하 및 고회전속도에서는 배기규제값을 만족시킬 수 없음을 확인하였다.⁵⁾

배기 재순환에 의한 디젤기관의 실린더 라이너, 피스톤, 피스톤링 등 기관내부 부품의 마모연구는 매연에 의한 응착과 황산에 의한 부식이 주이지만, 기관을 저온에서 운전할 경우에는 주로 황산에 의한 마모가 대부분인데, 연료중의 유황 함유량을 감소시킴으로써 마모증가가 억제된다는 사실이 입증되고 있다.^{6,7)}

기관에 EGR을 적용할 경우, 발생하는 마모증가의 영향에 관한 주요연구 관심대상은 유막에 부착된 매연의 증가⁸⁾, 연료중에 함유된 유황성분⁹⁾ 등이 있다. 마모연구에 관심을 가지면서 초기에는 유막내 매연증가에 의한 연마마모⁹⁾ 연구가 많았지만, 최근에는 재순환 배기중 SO_x에 의한 윤활유 열화¹⁰⁾, SO_x로부터 생성된 황산(H₂SO₄)에 의한 유막과판¹¹⁾ 등 SO_x에 의한 마모연구가 많이 이루어지고 있다. 연료중 유황성분의 97 ~ 98%가 연소중 산소와 반응하여 SO₂가 되고, 생성된 SO₂가 배기중에 배출된다. 배기의 일부를 재순환시키는 EGR의 경우, SO₂가 산화되어 SO₃가 되고, 물과 반응하여 H₂SO₄가 된다. 비교적 낮은 온도(400 ~ 420 K)에서 발생하는 황산은 매연입자를 핵으로 하여 그 주위에 결무하고, 재순환 배기가 통과되는 기관내부의 피스톤, 피스톤링 및 배기 통로판에 부착하여 부식시킨다(부식마모). 또한, 거칠어진 부식면은 마모가루, 윤활유의 산화 물, 매연 등의 미립자와 접촉하여 운동하는 경우에 연마제 작용을 하여 마모를 증대시킨다(연마마모).⁸⁾

본 연구에서는 마모증가의 원인규명보다는 EGR의 본질을 파악하기 위한 연구의 하나로서 디젤기관에 EGR을 적용한 경우, 매연, SO_x 등 배출물의 재순환이 피스톤 및 피스톤링의 마모량에 미치는 영향을 실험에 의하여 조사하고, 문제점을 최소화할 수 있는 디젤기관의 EGR시스템 제어기구를 개발하여 장착하기 위한 기초자료로 사용하는 것이 목적이다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

본 실험에 사용된 실험장치의 개략도를 Fig. 1에 나타내고 있는데, 기관은 국내에서 생산되고 있는 박용 수냉 2기통의 간접분사식 4행정 디젤기관이며, 주요 제원은 Table 1과 같다.

본 연구에서는 EGR시 재순환되는 배기가 기관내부 피스톤 및 피스톤링의 마모에 미치는 영

향을 조사하고 비교하기 위하여, 2기통 디젤기관의 제 1번 실린더에는 신기만을 흡입시키고, 제 2번 실린더에는 EGR을 20%인 재순환 배기가 물분사식 매연제거장치인 스크러버를 통과한 후, 서지탱크에 유입되어 동서지탱크에 유입된 신기와 혼합하여 연소실내로 흡입된다.

Table 1 Specifications of Test Engine

Items	Specifications
Type	2 Cylinder, Water-Cooled, 4 Cycle, Indirect Injection, Natural Aspiration
Piston Displacement(cc)	1630
Bore(mm)×Stroke(mm)	95 × 115
Maximum Power	14.71 kW / 1800 rpm
Fuel Injection Timing	BTDC 15.3°
Compression Ratio	19.96 : 1

2.2 물분사식 매연제거장치

Fig. 2에는 재순환되는 배기중의 매연 함유량을 제거할 목적으로 설계하여 제작된 물분사식 매연제거장치를 보여주고 있다. 기관에서 배출되는 배기가 스크러버 측면하단에 설치된 입구관(G_{in})으로 들어와서, 교란용의 링(ring)과 부딪치며 통과된 후, 지름 1 mm를 갖는 114개의 노즐구멍에서 분사되는 물에 의해 배기가 씻겨져 매연이 제거된다. 이 때 분사되는 유량은 솔레노이드밸브 유량계에 의하여 EGR율에 따라 자동적으로 조절할 수 있도록 되어 있으나, 본 연구에서

는 EGR을 20%만을 적용해서 실험을 하기 때문에, 유량은 일정량이 흐르고 있다. 이렇게 매연이 제거된 배기는 수분분리장치(demister)를 통과하면서 수분이 제거되고, 스크러버 상부의 출구관(G_{out})을 통하여 서지탱크내로 들어가 흡입된 신공기와 혼합된다. 분사된 물이 배기의 입구관을 넘지 않도록 스크러버 하단에 배출관이 설치되어 있고, 입구관을 통하여 들어온 배기가 바로 배출관으로 빠져나가는 것을 방지하기 위하여 저지판(baffle plate)을 스크러버 밑바닥에 설치하였다.

물분사식 매연제거장치의 성능에 대해서는 이미 저자들의 연구에 의해 밝힌 바 있는데, 부하에 따라서 다르기는 하지만, 30 ~ 50%의 높은 매연제거효율⁵⁾을 나타내고 있다. 따라서 디젤기관에 있어서 EGR을 채용하는 경우에는 매연제거의 한 방법으로 강구될 수 있다.

2.3 실험방법

실험조건은 부하 75% 및 기관회전속도 1600 rpm인 상태에서, 재순환 배기를 유입시키는 EGR을 20%인 경우와 EGR을 하지 않고 신기만을 흡입시키는 경우에 대하여, 400시간 운전한 다음, 피스톤 및 피스톤링의 마모량을 측정하였다. 동일조건에서는 부하, 기관회전속도 및 EGR율을 고정하여 실험을 하였지만, 400시간을 운전

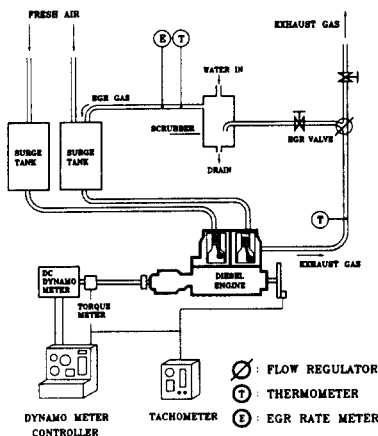


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

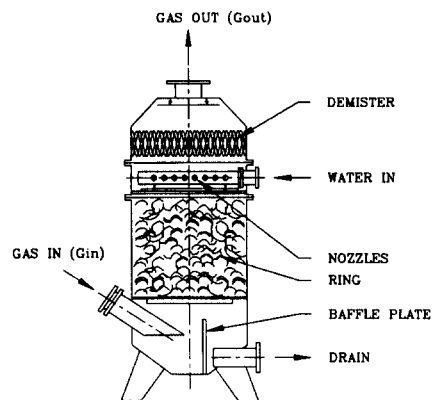


Fig. 2 Cross-section of a novel diesel soot-removal system with a cylinder-type scrubber

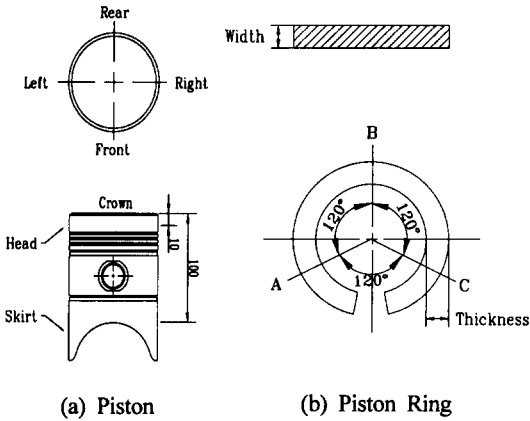


Fig. 3 Measurement spots of piston and piston ring

하는 동안 부하는 $\pm 5\%$, 기관회전속도는 $\pm 1\%$, EGR율은 $\pm 10\%$ 정도 변동하였다.

본 실험에서는 수냉식 열교환기를 사용하여 윤활유의 온도를 333 ~ 343 K가 되도록 조절하였고, 냉각수는 온도센서에 의해 입·출구온도를 313 ~ 323 K 정도로 일정하게 유지되도록 하여 기관의 작동상태를 수시로 점검하였는데, 온도는 K형 열전대를 설치하여 측정하였다. 배기관에도 K형 열전대를 설치하여 배기온도를 측정하였는데, 실험중 배기온도는 553 ~ 573 K가 되어 이 온도로 연소상태의 양부를 판단했다. 분사시기는 BTDC 15.3° 로 고정하였으며, EGR율을 구하기 위하여 흡기 및 배기관에서 CO₂ 농도를 측정하여 계산하기도 하지만,^{3,4)} 본 연구에서는 전체 흡입공기량에 대한 EGR밸브를 통해 재순환되는 배기량의 백분율로서 EGR율을 구하였다.

실험후 피스톤경의 마모량을 계산하기 위하여, 실험전에 기관을 분해하여 피스톤 정면(crown) 으로부터 10 mm 떨어진 헤드(head)부와 100 mm 떨어진 스커트(skirt)부에 대하여 Fig. 3 (a) 와 같이 외경을 90° 간격으로 전후좌우에 대하여 디지털 마이크로미터를 사용해서 측정하였다. 이 측정기는 측정범위가 75 ~ 100 mm이고, 최소눈금은 1 μm인 것을 사용하였다. 측정위치의 전후좌우에 대한 구분은 피스톤핀 구멍이 있는 방향의 정면을 전후로 하고, 90° 회전시킨 위치를 좌우로 했다. 피스톤링의 경우는 제 1번 링에

서 5번 링까지 절단부 틈새를 기준으로 Fig. 3 (b)와 같이 120° 간격으로 3개소의 폭과 두께를 디지털 마이크로미터를 사용해서 측정하였다.

Table 2 The outer diameters of piston head and skirt measured before and after the experiment to calculate the wear amounts of two cylinders at a front-rear spot

	Piston Head		Piston Skirt	
	No. 1 Cyl. (No EGR)	No. 2 Cyl. (EGR)	No. 1 Cyl. (No EGR)	No. 2 Cyl. (EGR)
Before Exp.(mm)	95.152	95.151	95.844	95.862
After Exp.(mm)	95.178	95.210	95.791	95.807
Wear Amounts (mm)	- 0.026	- 0.059	0.053	0.055

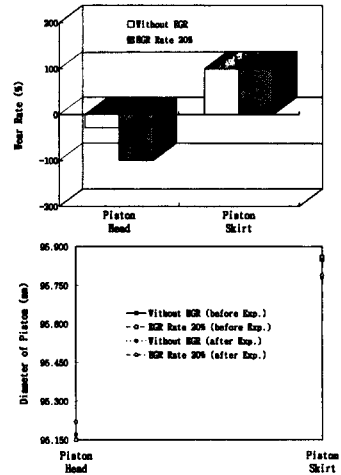


Fig. 4 Wear rates and outer diameters of piston head and skirt for a front-rear spot at the respective measured positions away from the crown

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 피스톤 마모

Table 2에는 피스톤 정면에서 10 mm 떨어진 헤드부와 100 mm 떨어진 스커트부의 피스톤핀 구멍이 있는 방향의 전후를 실험전후에 측정된 피스톤경의 차에 의한 마모량을 나타내고 있다. Fig. 4는 이러한 마모량의 상대적인 백분율인 마모율을 나타낸 것이다. 마모율은 EGR을 실시하

Table 3 The outer diameters of piston head and skirt measured before and after the experiment to calculate the wear amounts of two cylinders at a right-left spot

	Piston Head		Piston Skirt	
	No. 1 Cyl. (No EGR)	No. 2 Cyl. (EGR)	No. 1 Cyl. (No EGR)	No. 2 Cyl. (EGR)
Before Exp.(mm)	95.151	95.150	95.712	95.713
After Exp.(mm)	95.175	95.219	95.654	95.645
Wear Amounts (mm)	- 0.024	- 0.069	0.058	0.068

Table 4 The mean outer diameters of piston head and skirt measured before and after the experiment to calculate the wear amounts of two cylinders at two spots of front-rear and right-left

	Piston Head		Piston Skirt	
	No. 1 Cyl. (No EGR)	No. 2 Cyl. (EGR)	No. 1 Cyl. (No EGR)	No. 2 Cyl. (EGR)
Before Exp.(mm)	95.152	95.151	95.778	95.788
After Exp.(mm)	95.177	95.215	95.723	95.726
Wear Amounts (mm)	- 0.025	- 0.064	0.055	0.062

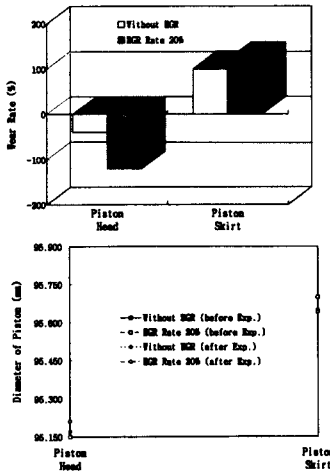


Fig. 5 Wear rates and outer diameters of piston head and skirt for a right-left spot at the respective measured positions away from the crown

지 않은 스킨부의 마모량을 100%로 하여 다른 측정부위에 대해서 보여주고 있는데, 스킨부의 전후에서는 EGR을 적용해도 마모율이 크게 증가하지 않음을 알 수 있다. 헤드부에서는 EGR의 적용여부에 관계없이 피스톤경이 오히려 증가하고 있는데, 특히 EGR을 적용하는 경우에 증가현상이 심하게 나타남을 알 수 있다. 그러나 실제로 피스톤 헤드부에도 마모가 많이 발생되었으리라 예상되지만, 매연이 부착되거나, 황산 등에 의한 부식이 발생되어 피스톤경이 오히려 거칠어져 측정상에 피스톤경이 증가되는 것처럼 보이는 현상이라고 생각된다. 피스톤의 표면을 스크레이퍼(

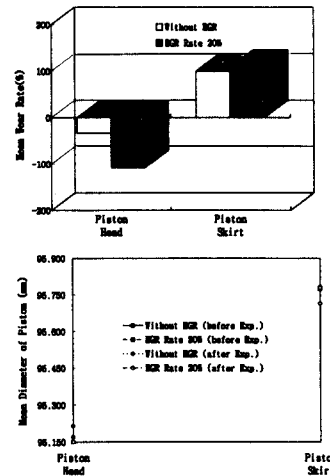


Fig. 6 Mean wear rates and outer diameters of piston head and skirt for two spots of right-left and front-rear at the respective measured positions away from the crown

scraper)를 사용하여 일부 제거도 시켜 보았지만, 완전하게 제거를 시키면 오히려 피스톤에 손상을 주어 정확한 측정을 할 수 없기 때문에, 그 상태에서 계측한 값 중 감소량을 +로 하고, 증가량을 -로 하여 백분율로 나타낸 마모율을 계산하였다.

Table 3과 Fig. 5는 Fig. 4에서와 동일한 방법으로 피스톤의 좌우위치에서 실험전후에 측정된 피스톤경의 차에 대한 마모량을 전후의 경우와 마찬가지로 EGR을 실시하지 않은 스킨부의 마모율을 100%로 하여 상대적으로 나타내었다. 스킨부에서는 EGR을 실시한 경우의 마모

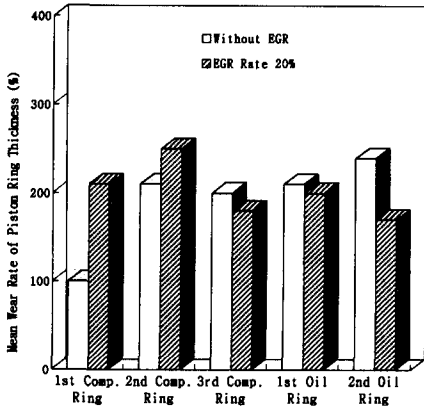


Fig. 7 Mean wear rate of piston ring thickness for 3 measured spots with intervals of 120° beginning from the ring end gap

율이 높게 나타났으며, 헤드부에는 EGR시의 피스톤경 증가현상이 극심하게 나타내고 있다. 위의 Fig. 4와 Fig. 5에 나타난 마모량과 마모율을 평균하여 나타낸 것이 Table 4와 Fig. 6이다. 스킴트부에서는 EGR시의 마모율이 약간 더 크게 나타났고, 헤드부에서는 EGR시 피스톤경의 증가현상이 현저함을 보여주고 있다.

浦辺¹²⁾ 등은 디젤기관에 피스톤링 랜드(piston ring land)부에서 채취한 윤활유중에 포함된 황산이온 및 수분 농도와 피스톤링 마모와의 관계, 또는 부동(浮動) 라이너법에 의해 측정된 EGR을 20% 적용시의 피스톤 마찰력에 대하여 실험한 결과, 유헴분이 없는 연료를 사용하여도 EGR에 의해 마모가 증가한다는 사실과, EGR가스중의 매연을 제거하면 마모가 대폭적으로 감소한다는 사실로부터 EGR시의 마모에 미치는 매연의 영향이 크다는 것을 확인하였고, EGR시의 마찰력은 압축행정 후반에 있어서 크게 증가하는데, 그 부분에서 이상마모가 발생할 가능성이 있고, 그 마찰력의 증가는 EGR가스중의 매연이 주요한 요인임을 확인하였다.

마모현상에 관한 종래의 연구¹³⁾에 의하면, 피스톤 정면으로부터 가까운 헤드부나 흡배기밸브 등 피스톤 정면부에 매연이 많이 퇴적되고 있음을 알 수 있는데, 본 실험에서 나타난 피스톤 헤

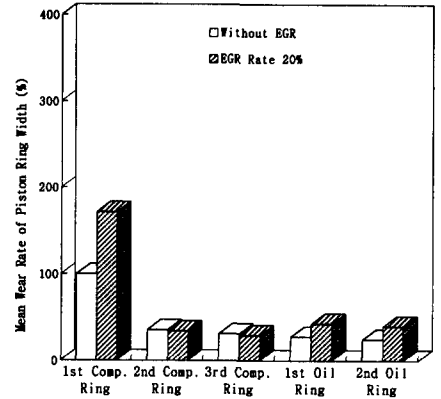


Fig. 8 Mean wear rate of piston ring width for 3 measured spots with intervals of 120° beginning from the ring end gap

드부의 증가현상도 EGR을 실시하는 경우에 헤드부가 상대적으로 연소가스와 접촉을 많이 하기 때문에, 매연의 퇴적이 많아지고, 황산의 생성에 의해 매연주위에 결무현상이 생겨 부식마모 등이 증가될 뿐만 아니라, 거칠어진 부식면에 대해 마모분 등에 의한 연마마모도 함께 발생될 것으로 예측된다.

3.2 피스톤링 마모

실험전에 제 1번에서 5번 링까지의 각 링 절단부 틈새를 기준으로 하여 120° 간격으로 3곳의 측정위치에 대해 피스톤링의 평균두께와 폭을 측정하였고, 실험후도 각 피스톤링에 대한 동위치의 평균 두께와 폭을 측정하였다. 실험전의 측정값을 기준으로 실험후에 측정된 값과의 차에 대한 마모량중, EGR을 적용하지 않은 제 1번 압축링의 경우를 마모율 100%로 하여 다른 조건에 대하여 상대적인 백분율로 나타내었는데, Fig. 7은 두께에 관한 마모율을, Fig. 8은 폭에 관한 마모율을 나타내고 있다.

링 두께의 마모율은 어느 경우에도 기준으로 잡은 EGR을 하지 않은 제 1번 압축링보다도 높게 나타났지만, 특히 EGR을 적용한 경우의 제 1번과 2번 압축링에서 기준값보다도 2배 이상의

마모율을 보여주고 있다. 그러나 제 3번 압축링과 제 4번, 5번의 오일링의 경우에는 오히려 EGR을 적용하지 않은 경우가 EGR시보다도 마모율이 더 크음을 알 수 있다. 링 쪽의 경우에는 다른 링에 비하여 제 1번의 압축링인 마모가 현저하게 크을 볼 수 있는데, 특히 EGR시에 마모율이 더 증가하고 있다. 그러나 제 2번과 3번 압축링은 EGR시에 오히려 마모율이 약간 감소하고, 제 4번과 5번의 오일링은 링두께의 경우와는 다르게 EGR시에 마모율이 더 증가되고 있음을 알 수 있다.

鹽崎 등⁸⁾은 EGR 내구성의 개선대책에 대한 연구에서 피스톤링, 라이너의 마모실험을 수행한 결과, 링마모에 미치는 인자가 아주 복잡하고, 특히 EGR의 경우에는 더욱 복잡하게 된다고 했다. 그는 실험결과로서 기관부하가 증가하면 마모도 급격하게 증가하고, 또한 EGR율을 증가시키면 마모가 증가하지만, 기관회전속도의 영향은 명확하지 않다고 하였다. 특히, EGR을 적용하지 않는 경우에 비하여 EGR율이 20%인 경우는 제 1번 링의 접동면에서 마모율이 4 ~ 5배, 제 2번 링의 접동면에서 4배, 제 2번 링의 상하면에서 1.5배 정도 증가함을 밝히고 있다.

浦辺 등¹²⁾은 연료중의 유황성분을 저감시킴에 의해 윤활유중의 황산이온농도가 크게 저하하고, EGR시의 링마모를 대폭적으로 개선시킬 수 있음을 디젤기관에 의한 실험에서 명백히 확인하였다.

윤활유중의 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 는 중화작용을 일으켜 부식을 억제한다. 디젤기관에 있어서 EGR을 실시하는 경우, 윤활유의 열화가 심해지는데, 이는 EGR에 의해 윤활유중 알칼리 지수의 저하가 빨라지고, 정헵탄(normal heptane) 불용해분 및 수지(resin)분의 증가가 빨라지기 때문이다. EGR율이 증가되면 매연생성량도 증가되는데, 이 매연이 윤활유에 혼입되어 정헵탄 불용해분을 증가시키고, 피스톤, 피스톤링 등의 부식면이 윤활유의 산화물 및 매연을 연마제로 작용하여 연마되어 마모를 촉진시킨다. 이러한 마모가루는 윤

활유에 혼입되어 열화되고, 이것이 정헵탄 불용해분 및 수지분을 증가시키게 된다. 앞에서 피스톤링의 마모량이 각각 다른 것은 링에 따라 부분적으로 황산농도가 다르기 때문에, 농도가 많은 곳에서는 윤활유에 의한 중화작용이 미쳐 이루어지지 않았을 것으로 생각된다.¹⁴⁾

4. 결 론

EGR을 디젤기관에 적용하는 경우, NO_x 이외의 다른 배기 배출물이 증가할 뿐만 아니라, 내구성, 신뢰성 등 많은 문제점이 발생한다. 그러나 NO_x 배출물의 저감대책으로 가장 유효한 방법중의 하나로 고려되고 있기 때문에, EGR 채용시에 발생하는 여러 가지 문제점을 최소화하는 연구도 필요하다. 본 연구에서는 디젤기관에 적용한 물분사식 매연제거장치를 통과한 재순환 배기가 피스톤 및 피스톤링의 마모에 얼마나 많은 영향을 미치고 있는가를 2개의 실린더중 첫번째 실린더에는 신기만을, 그리고 나머지 실린더에는 신기와 EGR을 20%의 재순환 배기를 흡입시켜 조사한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 피스톤의 스커트부에서는 비EGR시보다는 EGR시의 마모율이 약간 증가하였고, 헤드부에서는 피스톤경이 증가되는 현상을 보이고 있는데, 특히 EGR시에 현저함을 알 수 있었다.

2) 피스톤링 두께의 경우는 EGR시 제 1, 2번 압축링에서 마모율이 컸고, 폭은 제 1번 링의 마모율이 현저하였으며, 특히 EGR시의 마모율이 극심했다. 오일링의 두께는 EGR을 하지 않았을 경우에, 폭은 EGR시에 마모율이 증가함을 알 수 있었다.

본 연구에서는 마모량을 실험전후의 길이에 대한 측정값의 차로 나타내어 기준 마모량에 대한 상대적인 백분율로 마모율을 나타내고 있는데, 금후에는 마모량을 질량단위로 나타내는 실험을 할 필요가 있다고 생각되며, 마모손상 부위의 사진 및 매연 함유량에 따른 윤활유의 열화정도에 관한 연구와 부식에 관한 연구도 동시에 검토할 필요가 있다고 사료된다.

후 기

본 연구의 수행에 있어서 많은 자료를 제공해주고, 토론에 응해 준 東海大學 神本 武征 교수 (TIT 명예교수)와 明治大學 土屋 一雄 교수께 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 1) 裴明煥, “高壓下の豫混合氣燃焼におけるすす生成に關する研究”, 東京工業大學大學院 博士學位論文, pp. 1 ~ 21, 1989.
- 2) Arcoumanis, C., Bae, C., Nagwaney, A. and Whitelaw J. H., “Effect of EGR on Combustion Development in a 1.9L DI Diesel Optical Engine”, SAE 950850, pp. 169 ~ 193, 1995.
- 3) Bae, M. W., Jeon, H. J., and Choi, J. S., “The Effects of Recirculated Exhaust Gas on Fuel Economy and Exhaust Emissions in Marine Diesel Engines”, CIMAC DAY 1999 Shanghai - International Symposium on Internal Combustion Engine(Chinese Society for Internal Combustion Engine), pp. 91 ~ 105, 1999.
- 4) Bae, M. W., “A Study on the Effects of Recirculated Exhaust Gas on NO_x and Soot Emissions in Diesel Engines with Scrubber EGR System”, SAE 1999-01-3266, pp. 78 ~ 87, 1999.
- 5) Bae, M. W., and Ha, J. H., “A Study on the Characteristics of Fuel Economy and Exhaust Emissions in Diesel Engines with Scrubber EGR System”, Proceedings of the 15th Internal Combustion Engine International Symposium, pp. 287 ~ 292, 1999.
- 6) Dennis, A. J., Garner, C. P., and Taylor, D. H. C., “The Effect of EGR on Diesel Engine Wear”, SAE 1999-01-0839, pp. 45 ~ 57, 1999.
- 7) Gautam, M., Chitoor, K., Balla, S., and Keane, M., “Contribution of Soot Contaminated Oils to Wear II”, SAE 1999-01-1519, pp. 1 ~ 21, 1999.
- 8) 塩崎忠一, 鈴木孝幸, 大谷哲也, “ディーゼルエンジンにおけるEGRとその問題点について”, 日野技報, No. 38, pp. 3 ~ 15, 1989.
- 9) 長岐裕之, 是松孝治, “再循環排中のSO₂がディーゼルエンジンの磨耗に与える影響について(吸氣に混入したSO₂の効果)”, 日本機械學會論文集(B編), Vol. 60, No. 572, pp. 402 ~ 408, 1994.
- 10) Furuhashi, S., Suzuki, M., Ishikawa, H. and Watanabe, T., “The Primary Cause for Abnormal Wear in Diesel Engines with EGR Systems”, STLE Tribology Transactions, Vol. 34, No. 1, pp. 86 ~ 92, 1991.
- 11) 村上靖宏, “ディーゼルエンジンの硫酸腐食磨耗の解析 - オイル中硫酸イオンとエンジン磨耗の關係-”, 自動車技術會論文集, Vol. 24, No. 1, pp. 119 ~ 125, 1993.
- 12) 浦邊 滿, 友松 孝司, 佐藤 講一郎, 瀧口 良覺, “EGR時のリング磨耗とピストン摩擦力特性に關する研究”, 自動車技術會論文集, Vol. 29, No. 1, pp. 59 ~ 64, 1998.
- 13) 鹽崎忠一, 鈴木孝幸, “直噴ディーゼルエンジンのEGRが性能及び排ガスに与える影響”, 自動車技術會論文集, No. 46, pp. 18 ~ 23, 1989.
- 14) 塩崎忠一, 土橋敬市, “ディーゼルエンジンのEGR技術について”, 内燃機關, Vol. 51, No. 9, pp. 75 ~ 80, 1997.