스파크점화기관에서 흡기제어 방식이 부분부하 성능에 미치는 영향(2) - EGR 특성과 희석 방법의 비교

강 민 군¹⁾ · 엄 인 용^{*2)}

델파이코리아 기술연구소¹⁾ · 서울과학기술대학교 기계·자동차공학과²⁾

Effect of Intake Flow Control Method on Part Load Performance in SI Engine(2) - EGR Characteristics and Comparison of Dilution Method

Min Gyun Kang¹⁾ · Inyong Ohm^{*2)}

¹⁾Delphi Korea Technical Center, 2302 Yonggudae-ro, Giheung-gu, Yongin-si, Gyeonggi 446-912, Korea

²⁾Department of Mechanical & Automotive Engineering, Seoul National University of Science and Technology, Seoul 139-743, Korea

(Received 12 September 2013 / Revised 22 November 2013 / Accepted 2 December 2013)

Abstract : This paper is the second investigation on the effects of intake flow control methods on the part load performance in a spark ignition engine. In the previous work, two control methods, port throttling and masking, were compared with respect to lean misfire limit, fuel consumption and emissions. In this work, the effects of these two methods on EGR characteristics were studied and simultaneously the differences between EGR and lean combustion as a dilution method were investigated. The results show that EGR limit is expanded up to 23% and 3 ~ 5% improvement in the fuel consumption are achieved around 8 ~ 13% rates by the flow controls comparing with 10% limit and 1.5% reduction around 3% rate of non-control case. The masking method is more effective on the limit expansion than throttling as like as lean misfire limit; however there is no substantial difference in fuel consumptions improvement regardless the control methods except high load condition. Also it is observed that there exist critical EGR rates around which the combustion performance and NOx formation change remarkably and these rates generally coincide with optimum rates for the fuel consumption. In addition, dilution with fresh air is much more advantageous than that of the exhaust gas from the view point of dilution limit and fuel consumption, while utilization of the exhaust gas is more effective on NOx reduction in spite of considerably small dilution compared with the use of fresh air. Finally, the improvement of fuel consumption by massive EGR is highly dependent on the EGR limit at which the engine runs stably, therefore the stratified combustion technique might be a best solution for this purpose.

Key words : EGR(배기재순환), Dilution rate(희석율), Lean misfire limit(희박연소한계), Port throttling(포트 스톨링), Port masking(포트 마스킹), Stratification(성층화), Fuel consumption(연료소비율)

1. 서 론

내연기관에서 혼합기를 희석하여 연소하는 방식은 연비 개선 및 배기가스 저감에 매우 효과적인 방법이지만¹⁾ 이 방식을 스파크점화기관에 적용하는

경우, 초기 화염 핵의 형성과 발달이 불안정하고 화염전파속도가 감소하여 사이클 변동이 심해지며, 경우에 따라 사이클 변동에 의한 연비의 악화가 초래된다는 문제점이 내재되어 있다.²⁾ 또한 희석의 방법에 따라 연소실 내부의 산소농도가 증가하여 질소산화물 배출량이 증가하는 단점도 있다. 그럼에

*Corresponding author, E-mail: iyohm@seoultech.ac.kr

도 불구하고 혼합기 또는 반응물의 회석은 연료변환 효율 향상에 가장 기본적이며 효과적인 방법이기 때문에, 스파크 점화기관을 대상으로 이에 대해 많은 연구와 기술적 시도가 있었다.

회석의 방법에는 두 가지가 있는데, 압축착화기관과 과거에 희박연소방식을 채택한 스파크점화기관에서 볼 수 있는 신기 회석 방식과^{3,6)} 배기를 재순환시키는 EGR(exhaust gas recirculation) 방식이 그것이며, 최근의 압축착화기관에서는 연비와 배기를 위해 두 방식을 모두 채용하기도 한다.

스파크점화기관으로 논의를 국한하면, 신기에 의한 회석 방식은 현재까지 희박 영역에서 촉매에 의한 질소산화물의 정화 기술이 규제를 만족시키기에 충분한 수준까지는 이르지 못하였기 때문에 실제 적용에 어려움이 많고 현실적으로 가능한 회석의 방법은 배기재순환(EGR)이 유일하다.

배기재순환을 하면 불활성 가스의 증가로 연소실 내 온도가 낮아져 질소산화물의 생성이 억제되고, 작동 유체 중 이산화탄소, 물 등 재순환 가스에 혼합된 3원자 분자의 분율 증가 및 작동 유체 온도 저하에 따라 비열비가 증가하고 펌프 손실이 감소하여 기관 사이클 효율이 높아져 연비가 개선되는 긍정적 효과가 있는 반면, 연소 환경 악화에 의한 기관의 안정성이 저하 및 미연탄화수소의 증가라는 부정적 효과가 있다.

EGR이 도입된 원래의 목적은 연비 개선보다 질소산화물 발생 억제가 주목적이었고, 연비의 개선은 의도치 않은 부수적 효과에 불과했다. 실제로 특별한 장치나 방법이 적용되지 않은 통상적인 기관에서 최대로 가능한 EGR율은 10% 내외이며 운전성을 고려한 실용 범위는 5% 전후이다. 5% 정도의 EGR로 질소산화물 발생 억제 효과는 충분히 얻을 수 있는 반면 연비 개선의 효과는 1~2%에 불과하고, 연비 개선을 목적으로 EGR을 이보다 더 증가시키는 경우 기관의 불안정성의 증가에 따른 운전성 악화와 미연탄화수소의 배출 증가에 따른 배기제어 문제가 발생한다.

이러한 문제점이 있음에도 기관의 연비 개선은 현재 가장 중요한 기술적 과제 중의 하나이므로, 최근에 연비개선을 목적으로 스파크점화기관에 EGR

적용을 적극적으로 검토하기 시작하였지만,^{7,9)} 아직 기관 성능 특성과 관련하여 충분한 연구는 이루어지지 않았다.

연비의 개선을 위해 EGR을 적용할 때 중요하게 고려해야 할 사항은, 통상적인 기관의 EGR 한계 내에서는 충분한 연비 개선 효과를 얻기 어려우므로, EGR 한계를 높여 현재 통상적으로 가능한 수준보다는 더 높은 EGR율로도 운전성이 저하되지 않고 기관이 작동되도록 해야 실질적으로 연비 개선이 가능하다는 것이다. 즉 일단 EGR 한계를 확장하여 대량 EGR을 가능하게 하는 것이 매우 중요하다.

EGR 한계를 높이기 위해서는 안정된 점화와 초기 화염 발달 및 빠른 화염전파가 확보되어야 하는데, 이에 가장 적합한 연소방식은 희박연소에서 그 유효성이 입증된 성층화 연소이다.^{4-6,10-14)} 그 이유는 연소에 유리한 성층 분포 상태에서는 점화 플러그 주변에 농후한 혼합기가 생성되어 점화의 안정성과 잘 발달된 초기화염이 확보되고, 이후 성층화를 유도하기 위해 유도된 강한 내부 유동이 빠른 화염전파를 가능하게 해 주는데,^{6,13,14)} EGR과 희박연소는 회석에 사용되는 가스만 차이가 나고 본질은 동일하기 때문이다. 따라서 희박연소한계가 높을수록 EGR 한계가 증가한다.

본 연구와 동시에 진행된 연관 연구¹⁵⁾에서 마스크에 의한 흡기제어는 기관 흡기계의 변경 없이 간단히 적용할 수 있고 아울러 포트 스로틀링보다 더 효과적으로 성층 연소를 유도할 수 있는 것을 확인하였다. 본 연구에서는 이전 연구와 같은 맥락에서 동일한 기관에 스로틀링과 마스크를 적용하여 기관의 EGR 성능을 파악함으로써 이 두 방법의 차이점을 알아보고 아울러 회석의 방법으로 EGR과 희박연소 방식을 비교해 보고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

Fig. 1에 기관의 성능 실험을 위한 실험 장치의 개략도를 나타내었다. 실험 장치는 단기통 기관, 기관 동력계(G. Cussons GB/DC40) 시스템, 연료유량계, 배기가스 분석기(Horiba, Motor exhaust gas analyzer MEXA-8120), 공연비 측정기(A/F meter), 각종 센서 및 제어시스템(Motec ECU M800)으로 구성되어 있

Fig. 1 Schematics of experimental apparatus

Table 1 Specifications of engine and test condition

Engine type	DOHC	
NO. of cylinder	1	
Bore × Stroke (mm)	86 × 86	
Compression ratio	10.5	
Valve timing	9/47/34/10 (IVO/IVC/EVO/EVC)	
Ricardo swirl No.	Without Control	0.09
	Throttling	1.69
	Masking	1.26
Test Condition (RPM/BMEP (bar))	1500/1.5 2000/2.0 2000/4.0

Fig. 2 Port masking and throttling

다. 시험에 사용한 단기통 기관의 주요 제원과 시험 조건은 Table 1에 나타내었다

포트 마스크와 포트 스로틀링의 형상 및 장착 방법은 Fig. 2에 도시하였다. 포트 마스크는 선행 연구에서 성층화에 의한 희박연소한계 확장 효과가 가장 큰 1/4 대각선형 마스크 형상을 적용하였다.¹⁵⁾ 마스크와 스로틀링의 구체적 특징 및 적용 방법은 이전 논문에서 상세히 다루었으므로 생략하겠다.

EGR 율은 흡기관 절대압(MAP, manifold absolute pressure)과 흡기 온도 그리고 공연비 및 연료소비율을 근거로 다음과 같은 방법으로 산정하였다. 이 방

법으로 EGR 율을 계산하는 경우, 흡기관에서 이산화탄소의 농도를 측정하는 EGR 측정기를 사용하여 얻은 EGR 율과 비교하면 EGR 율로 1% 이하의 차이만 발생하므로 충분히 사용이 가능하며, 다음과 같이 EGR 율을 계산한다.¹⁶⁾

기관에 순수하게 흡입되는 신기 공기량 $\dot{m}_a$ 는 연료소비율과 공연비로 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\dot{m}_a(\text{g/s}) = \text{BSFC} \cdot A/F \cdot P_b/3600 \quad (1)$$

부분부하에서 흡기관의 각종 동적 효과는 무시할 만하므로, 충전 말기 실린더 내 압력파 MAP이 거의

같다고 볼 수 있다. 그리고 흡기관 내 온도와 충전 말기 실린더 내 온도가 같다고 가정하여 실린더 내의 총 공기량을 계산한다. 흡기관에서 흡입공기의 밀도 ρ 는 이상기체 상태식을 통해 다음과 같이 된다.

$$\rho \text{ (kg/m}^3\text{)} = \text{MAP}/(0.287 \times T(\text{K})) \quad (2)$$

따라서 실린더 내 총 공기량 $\dot{m}_{at}$ 은

$$\dot{m}_{at} \text{ (g/s)} = V_d \times \rho \times N/0.12 \quad (3)$$

실린더 내 최종 충전물은 신기, 잔류가스로 구성되므로 총 잔류가스율 RGF(Residual Gas Fraction)은 다음과 같이 계산될 수 있다.

$$\text{RGF}(\%) = (1 - \dot{m}_a/\dot{m}_{at}) \times 100 \quad (4)$$

총 잔류가스의 증가는 순수하게 EGR에 의한 것이므로 EGR 율은 다음과 같다.

$$\text{EGR}(\%) = \text{RGF} - \text{RGF}_{\text{ref}} \quad (5)$$

여기서 RGF_{ref} 는

희박연소와 EGR을 동일한 희석율로 비교하기 위해 신기의 희석율 (DR; dilution rate)을 다음과 같이 정의하였다.

$$\text{DR}(\%) = (\dot{m}_a - \dot{m}_{\text{ref}})/\dot{m}_{\text{ref}} \times 100 \quad (6)$$

여기서 $\dot{m}_{\text{ref}}$ 는 이론공연비에서의 흡입 공기 질량이고 $\dot{m}_a$ 는 임의의 공연비에서 흡입 공기 질량이다.

흡기제어를 하지 않은 경우 및 스로틀링/마스킹 상태에서 EGR 반응특성시험을 통해 EGR 한계, 연비 및 배기를 파악하였다. 이때 운전 조건은 연관 연구와 동일한 조건에서 실험을 통해 확인된 최적 분사시기와 성층화 효과가 크지 않은 흡기행정 이외의 분사시기에 대하여 실시하였다. 한계 EGR의 결정은 가스 분석기에서 측정되는 미연탄화수소(Unburned HC)의 변동과 토크의 변화를 기준으로 판단하였다. 통상적으로 토크의 경우 $\pm 5\%$ 의 변동을 운전한계로 보고 있지만, 경우에 따라 토크의 변동한계에 도달하기 전에 간헐적인 부분 연소에 의해 미연탄화수소 배출이 순간적으로 증가하기도 한다. 본 연구에서는 HC 값의 스파이크 현상 및 토크 변동 폭 중 먼저 관찰되는 것을 기준으로 판단하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 EGR 특성

Fig. 3에 흡기제어 기구에 따른 EGR 특성 시험결과와 중 EGR 율에 따른 연비변화를 그리고 Table 2에 각 조건 별로 연비 개선량과 그때의 EGR 율을 나타내었는데, 흡기제어 기구의 유무와 제어 기구의 종류 그리고 분사시기에 따라 매우 다양한 현상이 관찰된다.

먼저 제어 기구에 의한 EGR 한계 확장의 효과는 1500RPM/1.5 bar BMEP와 2000RPM/2.0 bar BMEP의 경우 흡기제어를 하지 않았을 때 한계 8% 수준에서 제어 기구를 적용하면 최적 분사시기에서 스로틀링의 경우 12% 근방 그리고 마스킹의 경우 16% 근방으로 확장되었고, 상대적으로 연소 조건이 양호한 2000RPM/4.0 bar BMEP에서는 12% 수준에서 각각 18% 및 23%로 개선되었다.

EGR 율에 따른 연비의 경향은 연관 연구에서 논의한 공연비 변화에 따른 연비 경향과 대체로 일치하지만 몇 가지 주목할 만한 차이점이 관찰된다.

우선 이전의 연관 연구에서 관찰된 것과 동일하게 제어 기구의 적용으로 모든 운전 조건에서 연비

Fig. 3 BSFC as a function of EGR rate

Table 2 Improvement of BSFC by EGR according to operation condition and control method (%)

Compared to without-control and 0 EGR			
RPM/Load	Contol	No EGR	Optimum EGR
1500/1.5	-	-	1.7
	Throttling	1.7	5.2
	Masking	1.7	5.2
2000/2.0	-	-	1.4
	Throttling	2.1	4.8
	Masking	1.6	4.7
2000/4.0	-	-	1.7
	Throttling	0.4	3.2
	Masking	0	3.5
Compared to 0 EGR in same control method			
RPM/Load	Contol	Max. Improvement	Corresponding EGR Rate(%)
1500/1.5	-	1.7	3.1
	Throttling	3.6	8.2
	Masking	3.6	8.4
2000/2.0	-	1.4	3.3
	Throttling	2.8	7.6
	Masking	3.1	8.4
2000/4.0	-	1.7	6.6
	Throttling	2.8	8.8
	Masking	3.6	13.8

가 향상되는 것이 되는데, 이 부분에 관한 논의는 이미 연관 연구에서 하였으므로 생략하겠다.

특이한 현상은 흡기제어를 하지 않은 경우, 연소 조건이 양호하여 한계가 10% 이상인 2000/4.0을 제외하고 8% 정도의 한계를 가진 1500/1.5와 2000/2.0은 연비가 향상되는 EGR 율 구간이 매우 좁아 3% EGR에서 약 1.5%의 연비 개선 효과가 있고 5%를 넘어서면 효과가 없거나 오히려 악화된다. 2000/4.0에서도 연비가 악화되는 EGR 율은 10%를 넘지만, 최대 연비 개선은 EGR 율 6.6%에서 1.7%에 불과하다. 이것은 흡기제어를 하지 않은 경우, EGR에 의한 연비 개선 효과 즉 펌핑 손실 감소 및 효율 증가가 기관의 연소 불안정에 의한 연비 악화 효과를 충분히 극복하지 못하기 때문에 개선 폭도 작고 개선되는 EGR 율의 범위도 좁은 것으로 판단된다.

결론적으로 통상적인 기관에서는 연비 개선을 얻을 수 있을 만큼 충분한 EGR 한계의 확보가 어렵고 연비 개선의 폭도 제한적이며, 이러한 점이 실용 범

위 5% 내외로 주로 질소산화물 제어 목적으로 사용된 이유이기도 하다.

흡기제어를 실시하여 EGR 한계를 확장한 경우 EGR에 의한 연비 개선 효과는 제어를 하지 않은 경우보다 뚜렷이 나타나지만, 여기서도 연소조건 및 운전 조건에 따라 여러 차이점이 관찰된다.

1500/1.5와 2000/2.0은 모두 EGR 율 8% 근방에서 통상적인 기관에 EGR을 하지 않은 경우보다 5% 정도의 연비 개선 효과가 있다. 반면 연소 조건이 양호한 2000/4.0의 경우 3% 정도의 개선에 그치고 있다. 반면 동일한 제어 기구 및 운전 조건에서 순수한 EGR 효과에 의한 연비 개선은 속도 및 부하 증가에 따라 마스킹이 미세하게 유리한 경향이 있으나 전체적으로 모든 조건에서 3% 정도로 기구 및 조건 별로 큰 차이가 나지 않는다. 통상적으로 개발 현장에서는 EGR 3% 당 1% 정도의 연비 개선 효과를 기대하는데, 본 연구 결과도 이 범주에서 크게 벗어나지 않는다.

마지막으로 EGR 율에 따른 연비 변화의 경향은 2000/4.0 만 제외하고 최저 연비 이후 급격히 연비가 악화됨을 볼 수 있다. 이러한 특징은 같은 희석이라도 신기 희석에 의한 희박연소와 상당히 다른데, 이 부분은 후술하는 희석 방법의 비교에서 자세히 논의하겠다.

Fig. 4에는 EGR 율에 따른 질소산화물의 배출 특성을 도시하였고, 최소 연료소비율에서 NO_x 감소를 정량적으로 비교한 것을 Table 3에 나타내었다. EGR에 따른 NO_x 감소는 일정 배출량까지는 대체로 직선적이다가 이후 점근적으로 감소하는데, 대체로 2~3g/kWh에 도달하면 점근적 감소의 경향을 보인다. 특이한 것은 직선적 감소에서 점근적 감소로 천이하는 EGR 율이 대체로 최소의 연료소비율이 되는 EGR 율과 일치하는데, 이것은 이 EGR 율이 일종의 연소 성능의 분기점이 되어 이를 전후로 연소 상태가 매우 다르다는 것을 의미한다고 볼 수 있다. 즉 다음과 같은 해석이 가능하다.

동일 공연비에서 질소산화물의 발생은 전적으로 온도에 의해 좌우되기 때문에 배출량이 많다는 것은 연소온도가 높은 것을 의미하고, 이는 달리 표현하면 연소가 양호하다는 것이다. EGR을 실린더 내

Fig. 4 BSNOx as a function of EGR rate

Table 3 NOx reduction and unburned HC increasement by EGR according to operation condition and control method at minimum fuel consumption EGR rate (%)

Compared to without-control and 0 EGR			
RPM/Load	Control	NOx	HC
1500/1.5	-	50.8 ↓	0
	Throttling	76.3 ↓	86.7 ↑
	Masking	80.2 ↓	158.2 ↑
2000/2.0	-	33.6 ↓	0
	Throttling	83.7 ↓	59.2 ↑
	Masking	71.6 ↓	72.9 ↑
2000/4.0	-	70.4 ↓	18.4 ↑
	Throttling	68.8 ↓	56.7 ↑
	Masking	84.4 ↓	51.2 ↑
Compared to 0 EGR in same control method			
1500/1.5	Throttling	82.8 ↓	37.7 ↑
	Masking	85.3 ↓	69.3 ↑
2000/2.0	Throttling	83.5 ↓	43.1 ↑
	Masking	78.3 ↓	36.5 ↑
2000/4.0	Throttling	75.5 ↓	25.0 ↑
	Masking	88.0 ↓	33.3 ↑

총 잔류가스에 포함시키고 잔류가스 양이 많을 때 부터 연소 상태를 고려해 보자. 실화나 부분연소 없이 정상적으로 연소가 진행될 수 있는 한계 잔류가

Fig. 5 Calculated burn duration with Arrhenius form reaction rate (a) and 10 ~ 90% mass burn duration (b) as a function of corrected equivalent ratio

스 양에서 시작하여 점차 잔류가스 양을 줄이면(여 기서는 EGR 양을 줄이면), 아주 미소하게나마 연소가 개선되어 질소산화물의 배출은 약간 증가하지만, 개선된 연소가 안정성 변화를 극복하여 연비를 개선할 수 있는 수준까지는 도달하지 못한다. 계속해서 잔류가스를 줄여 어느 한계를 넘어서면 연소는 급속히 개선되기 시작하여, 잔류가스 감소에 따라 질소산화물 배출이 직선적으로 증가한다.

이러한 회석량에 따른 연소의 변화는 Arrhenius 형태의 열 발생을 하는 경우 일정 회석량을 기준으로 발생하는데 이 예를 Fig. 5에 제시하였다.¹⁷⁾ 그림에서 보듯이 일정한 회석량 이상에서는 연소 속도가 급격히 저하됨을 알 수 있다. 따라서 EGR 증가에 따라 연소가 급격히 악화되는 일종의 임계값이 존재하고 이 임계값에 도달하기 전에는 EGR 증가에 따른 연료소비율과 질소산화물의 감소는 직선적이다가 이 값을 넘어서면 점근적 형태를 지나다고 판단된다.

최소 연료소비율의 EGR율에서 EGR 한계가 낮은 경우를 제외하면 대체로 NOx는 80% 정도 감소하는데, 운전조건 및 제어 방식에 따라 차이가 존재한다. 다른 측면으로 감소율 보다는 최소의 연비를 달성하면서 도달할 수 있는 최소 배출량이 2-3g/kWh 정도로 보고, 감소율은 EGR을 적용하지 않았을 때의 배출 수준에 따라 달라진다고 보는 것이 타당하다.

Fig. 6 BSHC as a function of EGR rate

Fig. 6은 EGR 율에 따른 미연탄화수소의 발생을 도시한 것이고 최소 연료소비율에서 발생량의 증가를 Table 3에 제시하였다.

EGR 율에 따른 미연탄화수소의 발생 특징은 EGR 증가에 따라 크지 않은 구배로 서서히 증가하다가 일정 양 이상에서 급격히 증가하는데, 1500/1.5는 6%, 2000/2.0은 11% 그리고 2000/4.0은 조건에 따라 10-20% 근방부터 증가가 두드러진다. 속도와 부하가 낮을수록 낮은 EGR 율에서부터 급격한 증가가 시작되고 구배도 큰 특징을 가지고 있는데, 이는 속도와 부하가 낮을수록 연소 조건이 악화되기 때문이다.

3.2 회석 방법의 비교

배기 후처리 문제를 비롯하여 기술적으로 해결해야 할 과제가 많음에도 불구하고, 흡기의 회석은 기관의 연비 개선에 매우 효과적인 방법이다. 회석의 방법으로는 신기 회석 즉 회박연소와 배기를 이용한 회석 즉 EGR이 있는데, 이 두 방법은 회석에 사용하는 가스의 종류만 다르기 때문에 이상공기 사이클의 관점에서는 동일하고 연료 공기 사이클의 관점에서도 팽창행정 중 비열비에 약간의 차이만

Fig. 7 BSFC as a function of dilution rate

존재하므로 큰 차이가 없다. 다만 회석 가스의 조성 이 다르기 때문에, 회석이 연소에 미치는 영향은 여러 측면에서 달라질 수밖에 없고, 이에 따라 연비 및 배기의 특성도 달라진다. 여기서는 앞서 언급한 회석율의 개념을 도입하여, 동일한 회석량 즉 연소에 필요한 신기 이외에 추가로 공급된 회석가스를 동일한 기준으로 환산하여 그 영향을 비교해 보고자 한다.

Fig. 7은 회박연소와 EGR을 동일한 회석율로 비교하였을 때 각 운전조건 및 흡기제어 방법에 따른 연비를 도시한 것이다.

그림에서 가장 두드러진 특징은 비교할 수 없을 정도로 신기 회석의 한계가 훨씬 크다는 것과 회석에 의한 연료소비율의 감소도 신기 회석이 훨씬 효과적이라는 것이다. 이것은 회석에 의해 연소 조건이 악화되는 것은 동일하지만, 신기 회석은 회석 공기에 산소가 포함되어 있고 아울러 회석이 증가할수록 산소의 양도 증가하므로 혼합기가 연소를 할 때 산소를 접할 확률이 높고, 반면 배기에 의한 회석은 회석의 증가에 따라 오히려 산소와 접촉할 확률이 줄어들어 연소 환경이 급격히 악화되기 때문이다. 따라서 연소 환경의 측면에서는 신기 회석이 배

기 회석과는 비교할 수 없을 정도로 유리하다.

회석율에 따른 연료소비율의 변화도 회석의 본질과 연소 안정성에 대한 중요한 사실을 내포하고 있다. 우선 적절한 흡기제어를 하여 회석의 한계가 확장될수록 회석에 따른 최소 연비는 감소한다. 그리고 1500/1.5와 2000/2.0의 경우, 배기에 의한 회석이 심한 연소 불안정으로 이어져 연료 소비가 급속히 증가되기 전까지는 회석율에 따른 연료 소비의 감소가 신기 회석과 정량적으로 일치한다. 이것은 회석에 의한 연료 소비율의 감소는 회석 가스의 종류와 관계없이 동일한 메커니즘 즉 높은 흡기관 압력에 의한 펌프 손실의 감소와 팽창 행정 중 비열비 변화에 의한 효율의 증가에 의한 것임을 나타낸다. 다만 회석의 한계와 연료 소비율이 최소가 되는 최적의 회석율은 회석 가스의 종류에 따른 연소 안정성이 결정을 한다.

2000/4.0의 경우 1500/1.5와 2000/2.0과는 연료소비율의 변화가 조금 다른 형태를 보여주고 있는데, 회석의 방법에 따라 연료소비율의 차이가 뚜렷이 양분되어 나타나고 있다. 덧붙여 연관 연구¹⁵⁾ 및 Fig. 3에서 관찰되었듯이 연소 환경이 비교적 열악한 다른 운전 조건에서는 흡기제어의 적용만으로 회석율 0에서도 연비가 개선된 것에 비해, 이 운전조건에서는 회석율 0에서는 모두 동일하고, 회석의 효과도 흡기제어 방법 및 회석 가스의 종류에 따라 달라 나타난다.

이것은 2000/4.0는 비교적 높은 부하 조건이므로 제어 기구를 장착하지 않은 상태에서도 연소 조건이 양호하기 때문에 회석이 없을 때는 제어 기구 장착에 의한 추가적인 안정성 확보 효과가 상대적으로 적고, 이어 회석 방법에 따라 배기 회석의 경우 회석량 증가에 따른 연소 안정성의 악화가 상대적으로 커서 회석에 의한 연료 소비율의 감소가 적고, 비교적 안정된 연소가 보장되는 신기 회석은 상당히 높은 회석율까지 꾸준히 연비가 개선된 것으로 판단된다.

Fig. 8은 회석에 따른 질소산화물의 배출 특성을 도시한 것이다. 질소산화물의 발생은 연소실 내 온도와 기연 가스 중 산소 농도에 따라 달라지므로, 회석 가스에 산소의 포함 유무에 따라 배출 특성이 달

Fig. 8 BSNOx as a function of dilution rate

라지는 것은 지극히 당연하지만, 그림에서 볼 수 있듯이 정량적으로 질소산화물 배출 억제 효과는 연료소비율과는 반대로 배기에 의한 회석이 매우 적은 회석율로도 신기 회석으로는 도달할 수 없는 수준까지 이른다는 것이다.

이 점이 질소산화물의 후처리가 문제가 되는 경우 연비 측면에서는 불리하지만 배기 회석이 장점이 될 수 있는 부분이다.

Fig. 9는 회석에 따른 미연탄화수소의 발생을 나타낸 것이다. 미연탄화수소의 발생도 회석 가스에 포함된 산소의 양이 가장 중요한 변수이므로, 배기 회석이 신기 회석보다는 불리한 것은 자명하다. 그리고 신기 회석은 연소 조건에 관계없이 일정한 변화의 형태를 보여 주고 있으며, 특히 회석의 한계점 부근에 접근하여도 회석율 증가에 따른 급격한 배출 증가 없이 비교적 구배가 일정하다. 반면 배기 회석은 회석 한계에 접근함에 따라 배출량이 대폭 증가하며, 특히 연소에 불리한 조건일수록 이러한 경향은 심화된다.

비교를 종합하면 연소 측면에서는 신기 회석이 배기가스 회석보다 훨씬 유리하고 최대 한계도 크며 연비의 개선폭도 크다. 그러나 연소에 유리한 신

Fig. 9 BSHC as a function of dilution rate

기 희석은 희박 상태에서 질소산화물의 정화 문제가 해결되지 않는 한, 실제 적용에 한계가 있고 반면 배기 희석은 희석의 한계가 적어 연비개선의 폭이 적고 미연탄화수소의 발생이 증가하는 문제가 있지만, 현재의 차량 배기 제어 시스템의 틀 내에서 적용이 가능하다는 장점이 있다. 또한 정상 운전 조건에서 기관 자체의 연료 소비율은 신기 희석이 유리할 수 있어도, 차량에서 배기 제어를 위해 공연비 제어를 하는 경우 연비 개선의 효과는 저하되지만, 배기 희석의 경우 촉매 작동 영역에서 공연비 제어의 필요성이 없으므로 기관에서의 연비 개선이 거의 그대로 차량 연비의 개선으로 연결된다는 장점도 아울러 가지고 있다.

두 방법의 단순 비교에서 벗어나 다른 가능성을 고려해 볼 수도 있다. 즉 두 방법을 혼합하여 연비 개선은 신기 희석에 주로 의지하고 질소산화물의 억제 배기 희석을 통해 해결하는 것인데, 아직 이에 대한 구체적 연구는 부재하고, 역시 신기 희석만 사용하는 것보다는 유리하지만 현재 시스템보다는 더 진보된 배기 후처리 장치의 개발이라는 부담이 상존한다.

결론적으로 EGR에 의한 연비의 개선은 어느 정

도 효과적이지만 희석의 증가에 따라 연소의 불안정성은 신기 희석에 비해 대폭 증가하므로 연소 개선에 대한 특별한 대책 없이 단순 EGR 적용만으로 연비를 가시적으로 개선하는 것은 매우 어렵다. 따라서 EGR에 의한 연비 개선을 위해서는 연소 안정성의 확보를 통해 EGR 한계를 높이는 것이 무엇보다 중요하며, 이를 위해 기존의 희박연소에서 채택 하였던 흡기제어를 통한 성층 연소 방식이 가장 효과적인 수단이라 할 수 있다.

4. 결 론

동일한 기관에 두 종류의 흡기제어 기구인 포트 스로틀링과 마스크를 적용하여 배기재순환 특성과 희석 방법에 따른 연비 및 배기를 비교한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 흡기제어를 통해 EGR의 허용 한계를 크게 향상시킬 수 있고, 희박 연소 한계가 높을수록 EGR 한계도 높아 스로틀링보다 마스크가 한계의 확장에 더 효과적이다.
- 2) 특정 EGR 율을 경계로 연소 상태가 급격히 변화하는 일종의 임계 EGR 율이 존재하며, 이 EGR 율 근방에서 연비는 최소가 되고 질소산화물의 발생 특성도 변화한다.
- 3) 신기 희석은 배기 희석과 비교할 수 없을 정도로 희석의 한계가 훨씬 높고 희석에 의한 연료소비율의 감소도 더 효과적이지만, 질소산화물 배출 특성은 연료소비율과는 반대로 배기에 의한 희석이 매우 적은 희석율로도 신기 희석으로는 도달할 수 없는 수준을 달성한다.
- 4) EGR에 의한 연비의 개선은 희석량 증가에 따라 연소의 불안정성이 신기 희석에 비해 대폭 증가하므로, 연소 개선에 대한 특별한 대책 없이 단순 EGR 적용만으로 연비를 가시적으로 개선하는 것은 매우 어렵다.
- 5) EGR에 의한 연비 개선을 위해서는 연소 안정성의 확보를 통해 EGR 한계를 높이는 것이 무엇보다 중요하며, 이를 위해 흡기제어를 통한 성층 연소 방식이 가장 효과적인 수단이라 할 수 있다.

후 기

이 연구는 서울과학기술대학교 교내 학술연구비 지원으로 수행되었습니다.

References

- 1) J. B. Heywood, Internal Combustion Engine Fundamentals, Int. Edn., pp. 281-282, McGraw-Hill, Singapore, 1988.
- 2) G. T. Kalghatgi, "Spark Ignition, Early Flame Development and Cyclic Variation in IC Engines," SAE 870163, 1987.
- 3) A. A. Quader, "The Axially-stratified-charge Engine," SAE 820131, 1982.
- 4) K. Horie, K. Nishizawa, T. Ogawa, S. Akazaki and K. Miura, "The Development of a High Fuel Economy and High Performance Four Valve Lean Burn Engine," SAE 920455, 1992.
- 5) T. Inoue, S. Matsushita, K. Nakanishi and H. Okano, "Toyota Lean Combustion System - The Third Generation System," SAE 930873, 1993.
- 6) I. Y. Ohm, H. S. Ahn, W. J. Lee, W. T. Kim, S. S. Park and D. U. Lee, "Development of HMC Axially Stratified Lean Combustion Engine," SAE 1993 Transactions 103(3), pp.1298-1311, 1994.
- 7) C. Park, Y. Choi and C. Kim, "Study on Fuel Consumption Improvement in SI Engine with EGR for Hybrid Electric Vehicle," Transactions of KSAE, Vol.16, No.2, pp.128-135, 2008.
- 8) C. Park, Y. Choi and C. Kim, "Analysis of Performance and Emissions Characteristics on Gasoline Engine for Hybrid Vehicles with Optimum EGR Rate and the Cylinder Variation of EGR Rate," Transactions of KSAE, Vol.17, No.1, pp.87-95, 2009.
- 9) D. Kim, S. Kim, S. Lee and J. Lim, "A Study of Fuel Economy Improvement Potential on US Fuel Economy Test Cycles by Model Based Development of Cooled HP-EGR System on GDI Engine," KSAE Spring Conference Proceedings, pp.191-196, 2012.
- 10) I. Y. Ohm, K. S. Jeong and I. S. Jeung, "Effects of Injection Timing on the Lean Misfire Limit in an SI Engine," SAE 1997 Transactions 106(3), pp.42-55, 1998.
- 11) I. Y. Ohm, K. S. Jeong, Y. Yoon and I. S. Jeung, "Initial Flame Development under Fuel Stratified Condition," SAE 1998 Transactions 107(3), pp.1796-1807, 1999.
- 12) I. Y. Ohm and C. J. Park, "Experimental Study on Axial Stratification Process and Its Effects (1)," KSME International Journal, Vol.16, No.11, pp.1457-1469, 2002.
- 13) I. Y. Ohm and C. J. Park, "Effect of Fuel Stratification on Initial Flame Development: Part 2-low Swirl Condition," Int. J. Automotive Technology, Vol.9, No.6, pp.671-678, 2008.
- 14) I. Y. Ohm and C. J. Park, "Effect of Fuel Stratification on Initial Flame Development: Part 3-high Swirl Condition," Int. J. Automotive Technology, Vol.12, No.5, pp.653-660, 2011.
- 15) M. G. Kang and I. Ohm, "Effect of Intake Flow Control Method on Part Load Performance in SI Engine - Comparison of Throttling and Masking," Transactions of KSAE, Vol.22, No.2, pp.156-165, 2014.
- 16) S. Kim, S. Lee, D. Kim, I. Ohm and Y. Cho, "EGR Ratio Estimation Using Predictions of In-cylinder Residual Gas Fraction in SI Engines," Transactions of KSAE, Vol.12, No.1, pp.55-60, 2004.
- 17) I. Ohm, "Combustion Characteristics of Landfill Gas in a Constant Volume Combustion Chamber for Large Displacement Volume Engine(I)-Fundamental Characteristics," Transaction of KSME-B, Vol.37, No.8 pp.733-741, 2013.