

## 프로판 엔진의 배기 포트에서 탄화수소 산화율 추정

이형승\* · 박종범\* · 민경덕\*\* · 김응서\*\*  
(1999년 9월 2일 접수)

### Estimation of Hydrocarbon Oxidation by Measuring HC Concentrations in an SI Engine Exhaust Port

Hyung-Seung Yi, Jongbum Park, Kyoungdoug Min and Eungseo Kim

**Key Words:** Hydrocarbon(탄화수소), Secondary Oxidation(2차산화), Gas Sampling System(기체채취법), Gas Chromatography(가스 크로마토그래피), Degree of Oxidation(산화도)

#### Abstract

In order to investigate the exhaust structure and secondary oxidation of unburned hydrocarbon (HC) in the exhaust port, concentrations of individual HC species were measured in exhaust process, the degree of oxidation were obtained. Using a solenoid-driven fast sampling system on single-cylinder research engine fueled with 94% propane, the profiles of unburned hydrocarbons (HCs) and non-fuel HCs with a propane fueled engine were obtained from several locations in the exhaust port during the exhaust process. The sampled gases were analyzed using a gas chromatography of HC species with 4 or lesser carbon atoms. The change of total HC concentration and HC fractions of major components through the exhaust port were discussed. The results showed that non-uniform distribution of HC concentration existed around the exhaust valve and changed with time, and that the exhaust gas exhibited nearly uniform concentration profile at port exit, which was due to mixing and oxidation. Also it could be known that bulk gas with relatively high HC concentration came out through the bottom of the exhaust valve. To estimate the mass-based degree of HC oxidation in the exhaust port from measured HC concentrations, a 3-zone diagnostic cycle simulation and plug flow modeling were used. The degree of oxidation ranged between 26 % and 36 % corresponding to the engine operation conditions.

#### 1. 서론

자동차가 도시 지역 대기 오염의 주된 원인으로 부상함에 따라 배기 가스에 대한 규제가 강화되는 추세에 있다. 배기 가스 규제를 만족시키기 위한 저감 기술의 개발을 위해서는 유해 배출물 발생 구조를 이해하는 것이 필수적이다. 지금까지

지 알려진 바에 의하면 유해 배출물 중 탄화수소(HC, hydrocarbon) 성분의 경우, 연료중의 일부는 벽면에서의 소염(flame quenching), 윤활유 층에서의 흡수 및 방출, 퇴적층(deposit)에서의 흡수 및 방출, 크레비스 체적(crevice volume)에서의 미연소, 전체 혼합기에서의 연소 불량 등의 원인으로 주 연소 과정을 겪지 않게 된다. 이러한 미연 탄화수소는 팽창 과정에서 실린더 내의 압력이 감소하면 연소실 안으로 들어가서 고온의 기연 가스와 혼합되고, 팽창 행정 말기와 배기 과정 중에 연소실이나 배기관에서 2차 산화 과정(late-cycle burn-up)을 겪는 것으로 알려져 있다.<sup>(1,2)</sup> 이러한 2차 산화는 일산화탄소 및 이산화탄소로의 산화 반응뿐 아니라 열합성(thermal

\* 서울대학교 정밀기계설계공동연구소

\*\* 회원, 서울대학교 기계항공공학부

E-mail : kadmin@snu.ac.kr

TEL : (02)880-1661 FAX : (02)883-0179

synthesis) 이나 열분해(pyrolysis) 등의 변환 과정을 포함한다.

탄화수소 배출물의 생성 및 산화, 배출에 대하여 보다 깊이 이해하기 위해서는 고속 샘플링 시스템을 사용하여 사이클 내 농도 변화를 고려하는 것이 필요하다고 생각된다. 이를 통하여 연소실 및 배기 포트 내의 탄화수소 생성 및 배출 경로를 파악하고, 나아가 탄화수소 저감 기술의 개발에 도움을 줄 수 있을 것으로 생각된다.

최근 들어 고속 FID(Fast Flame Ionization Detector)와 고속의 샘플링 밸브를 연소실 벽이나 배기관에 설치하여 탄화수소 농도를 측정하는 연구가 여러 곳에서 수행되어 왔고, 이를 통하여 엔진의 한 사이클에서 탄화수소 농도의 시간적 변화를 알 수 있었다. 그러나 FFID는 프로브의 위치를 달리함으로써 공간적인 분포를 파악할 수 있는 반면에 전체 탄화수소 농도만을 측정할 수 있고, 기존의 고속 샘플링 밸브를 사용한 방법은 탄화수소 종류별의 농도를 알 수 있는 한편, 공간적으로 자세한 분포 변화를 측정할 수 없었다.<sup>(3-5)</sup>

본 연구의 목적은 배기 과정 동안 탄화수소 배출물의 배출 과정을 실험을 통하여 해석함으로써 배기 포트 내 산화 과정의 특성을 파악하고, 포트 내 산화 촉진을 통한 탄화수소 저감 기술의 가능성을 확인하는데 있다.

이를 위하여 샘플링 프로브와 솔레노이드 구동 샘플링 밸브로 구성되는 최소 작동 시간 1.2ms의 고속 샘플링 시스템을 제작하였고, 배기 과정 동안 시간 및 공간별로 탄화수소 성분의 농도를 측정하여 전체 탄화수소 배출물과 개별 탄화수소 성분의 배출 과정을 파악하였다. 3영역 진단 해석 방법과 포트 내 플러그 유동 모델을 사용하여 배기 밸브를 지날 때와 포트 출구를 벗어날 때의 질량 유량을 계산하였고, 측정된 탄화수소 농도와 계산된 유량으로부터 포트 내 2차 산화율을 산출하였다.

## 2. 실험 장치 및 방법

압축비 8.5, 배기량 488cm<sup>3</sup>의 연구용 단기통 엔진(Toyota, TRE-2G)을 사용하였으며 엔진 동력계로 출력을 측정하였고 이를 대기 압력, 온도 및 습도에 대하여 보정하였다.

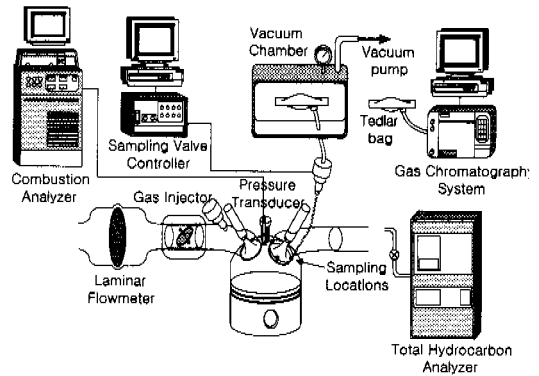


Fig. 1 Schematic diagram of experimental setup

연료 공급 장치로는 흡기관에 압축 천연 가스 용 인젝터를 설치하고 정해진 시기와 시간에 맞추어 분사할 수 있는 인젝터 구동기(driver)를 제작하였다. 인젝터는 SPI(Servojet Product Inc.)사 제품의 SP-021로서 볼 밸브형이며 솔레노이드에 의해 구동된다.

실험에 사용된 연료로 상용 액화 석유 가스(LPG)를 사용하였는데, LPG의 대부분을 차지하고 있는 프로판은 유효율에 대한 용해도가 충분히 낮으므로 탄화수소 생성 원인 중 유효율 막에 의한 것은 무시해도 좋다고 알려져 있다.<sup>(6,7)</sup>

배기 밸브 직후와 포트 출구에서 크랭크 각도별로 샘플링하기 위하여 샘플링 장치를 Fig. 1에서와 같이 구성하였다. 주어진 샘플링 기간 동안 샘플링 제어 PC의 신호는 구동기에서 피크-홀드 타입 전류 신호로 바뀌어 샘플링 밸브를 여닫게 된다. 샘플링 밸브가 열려있는 동안 샘플링 프로브 내의 배기 가스는 밸브를 통과하여 진공 용기 내의 샘플링 백에 포집된 뒤, 기체 크로마토그래피(모델 HP 5890 series II plus with EPC)로 분석된다. AQIRP phase II의 C4 이하의 탄화수소 분석 방법인 method 1을 기본으로 하여 분석 방법을 결정하였으며,<sup>(8)</sup> NIST-traceable 표준 기체를 사용하여 성분별 분석 및 중복 피크 확인, 정량 보정 과정을 수행하였다.

본 연구에서 사용된 샘플링 밸브는 Lucas Ledex사의 3EF 모델의 솔레노이드와 피크-홀드 타입 구동 회로를 사용하여 신속하고 안정적인 응답이 가능하도록 하였다.

샘플링 밸브로 배기 가스 시료를 채취하여 가스 크로마토그래피로 분석한 결과와 전체 탄화수소(THC) 값을 비교하기 위해 전체 탄화수소 분

Table 1 Test Matrix of Experiments

Base condition	1000 rpm, BMEP 390 kPa, coolant temp. 80 °C $\phi = 1.0$ , spark timing MBT
Cold condition	coolant temperature 20 °C
Low load	BMEP 80kPa
Retarded spark	spark timing TDC
Lean condition	$\phi = 0.8$
Rich condition	$\phi = 1.2$

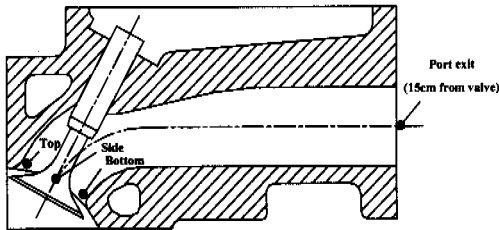


Fig. 2 Sampling locations in the exhaust port

석 장치로 Horiba사의 THC 분석기(모델 MEXA-9100)를 사용하였다.

본 연구에서는 배기 과정 중 탄화수소 성분별 농도의 변화에 영향을 미치는 인자로서 운전 조건 중 부하, 연료/공기 당량비, 점화 시기, 냉각수 온도를 택하였다. 기본 조건과 각 조건을 바꾸었을 경우로 나누어 나타낸 Table 1의 운전 조건에 대하여 실험을 수행하였다.

샘플링 위치는 Fig. 2에 나타낸 바와 같이 엔진의 배기 밸브 직후의 위(top), 옆(side), 아래(bottom)와 배기 밸브 이후 15 cm의 포트 출구(port-out) 등의 네 지점으로 하여 밸브 직후에서의 공간적 분포와 포트 내에서의 혼합 및 산화의 정도를 파악할 수 있도록 하였다.

### 3. 배기 포트 내 2차 산화율의 추산 과정

측정된 농도로부터 산화율을 계산하기 위해서 전체 밸브 커튼 면적을 대칭적으로 4개의 부분으로 구성되며 각 부분에서 해당 샘플링 위치에서의 농도로 균일한 것으로 가정하였다. 또한 포트 출구 단면에서는 탄화수소 각 성분의 농도가 균일하다고 가정하였다. 포트 입구 근처에서의 총

분한 혼합으로 인하여 밸브 이후 5.5 cm의 지점에서 반경 방향으로 무시할 만한 농도 구배가 측정된 바 있다.<sup>(4)</sup> 또한, 포트 출구 단면의 여러 위치에서 탄화수소 농도를 측정한 결과 위치별 전체 탄화수소 농도가 큰 차이를 보이지 않았다.

포트 내의 여러 위치에서 측정된 미연 탄화수소의 농도로부터 포트 내 산화율을 추산하기 위해서 농도장뿐만 아니라 유동장에 대한 고려가 필요하다. 이는 배기 과정 중 포트에 유입되거나 유출되는 유량이 크게 변하기 때문이다. 배기 밸브가 닫힌 동안이나 밸브 리프트가 작은 경우 포트에 유입되는 배기 가스는 높은 탄화수소 농도를 갖지만 유량이 작기 때문에 실제로 유입되는 탄화수소의 질량은 작게 된다. 따라서 이 때에 유입되는 탄화수소 질량은 사이클 전체를 통하여 유입되는 질량에서 차지하는 비율이 작으므로 긴 크랭크 각도 범위에 불구하고 산화율 추산에 미치는 영향은 작다. 또한 포트를 거치면서 배기 가스는 벽면과의 열전달로 인해 온도가 떨어지게 되며 이로 인하여 밀도의 상승 및 속도의 감소를 나타내게 되므로 포트 입구 및 출구에서의 정확한 질량 유량을 얻기 위해서는 포트 벽면으로의 열전달을 정확히 고려해 주는 것이 필요하다.

연소실 내 압력으로부터 3영역 사이클 진단 해석을 통하여 배기 밸브를 통해 유출되는 배기 가스의 질량 유량과 온도를 추산하였으며, 연소실에서 나오는 배기가스는 배기과정(128°ATDC ~ 372°ATDC)동안 크랭크각 1도에 하나씩 모두 245개의 엘리먼트로 나누어져 배기 포트에 유입되며, 새로 유입된 엘리먼트는 배기 포트에 있는 전 단계의 엘리먼트를 밀어내게 되며, 각 엘리먼트는 열전달을 고려하여 계산된 온도로부터 부피가 결정되고, 이로 부터 새로운 위치가 결정된다.

포트내의 유동 모델로 축 방향으로의 혼합이나 열전달은 무시할 수 있다고 가정하는 플러그 유동 모델을 사용하였으며, 배기가스로부터 벽면으로의 열전달 모델로 Caton의 모델<sup>(9)</sup>을 사용하여 포트 출구에서의 질량 유량 및 온도, 포트 체류 시간을 계산하였다.

배기 유동의 입구 조건으로 3영역 진단해석에 의해 구한 배기 포트 입구 및 출구에서의 질량 유량을 Fig. 3에 나타내었다. 기본 조건에서 구한 배기 가스 유량과, 연소실 내 질량이 크게 다른 저부하 조건에서의 유량만을 비교하여 나타내었

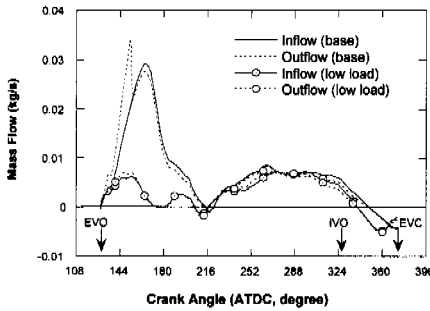


Fig. 3 Mass flow rates through port inlet and outlet at base and low load conditions

다. 배기 과정 초기 블로다운 기간의 높은 질량 유량은 기본 조건에서 확실하게 나타나지만 저부하 조건의 경우 주 연소 이후 연소실 내 낮은 압력으로 인하여 블로다운 기간 동안에 상대적으로 낮은 질량 유량을 보이고 있다. 하지만 피스톤 운동에 의해 밀려서 배기관으로 배출되는 배제 (displacement) 과정 중에는 질량 유량은 부하의 변화에 큰 영향을 받지 않는 것을 볼 수 있다. 이는 다른 운전 조건에서도 마찬가지로의 경향을 보이는데, 그 이유는 이 기간 동안 배기 가스의 배출이 배기 밸브 전후의 압력 차에 의한 것이 아니라 피스톤 운동으로 인한 것이기 때문이다.

밸브 오버랩중의 배기 유량은 흡기관으로의 질량 유·출입을 고려하여 계산하였다. 이 구간을 전후하여 고농도의 탄화수소가 배기관에 유입되는 것을 측정 결과를 통해 알 수 있으므로 배기 유량에 대하여 신중한 고려가 필요하다. 이를 위해, 진단 해석 방법에 의한 연소실 질량의 변화와 Lienesch의 모델<sup>[10]</sup>을 통한 흡기 밸브를 통한 역류 유량을 계산하여 배기 포트를 통한 역류량을 결정하였고 배기 포트의 유량 계산에 사용하였다. 이로부터 흡기압이 낮아 흡기관으로의 가스 유입이 큰 저부하 조건에서 다른 조건에서 보다 많은 양의 가스가 역류하는 것을 살펴볼 수 있었다. 이러한 역류는 배기 과정 말기에 피스톤 운동에 의해 유발되는 스크레이프-오프 와류 (scrape-off vortex)에 의한 미연 탄화수소 배출 과정을 억제하고 이미 포트로 배출된 고농도의 탄화수소를 역류시키기 때문에 탄화수소 배출 과정에 큰 영향을 미치는 것으로 생각된다.

이러한 모델에 의해 결정된 유량과 온도를 입

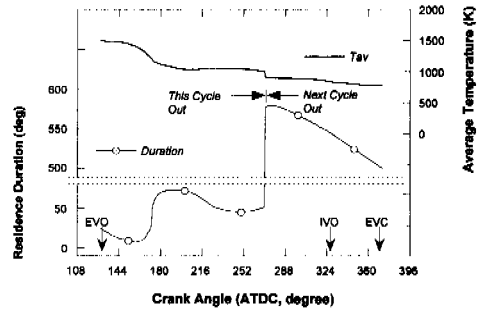


Fig. 4 Residence duration and average temperature of each plug element entering port at the crank angle

구 조건으로 하여 배기관에서의 유동 및 탄화수소의 산화율을 계산하였다.

#### 4. 결과 및 검토

##### 4.1 배기 포트 입구 및 출구에서의 특성

Fig. 3에서 나타낸 사이클 해석에 의한 포트 입구 온도 및 유속으로부터, 기본 운전 조건에서 각 플러그 엘리먼트들의 배기 포트를 거치는 동안의 평균 온도와 체류 시간을 Fig. 4에 나타내었다. 그림에서 포트 내 체류 시간은 x축에 표시된 크랭크 각에 포트로 유입된 플러그 엘리먼트들이 포트 출구(배기 밸브로부터 15cm 하류 지점)에 도달하기까지의 시간을 의미한다. 초기 고온의 플러그 엘리먼트들은 블로다운 기간 중에 높은 질량을 가지고 빠르게 배기 포트를 통과하게 될 수 있다. 반면에 배제과정 중반에 유입된 엘리먼트들은 체류 시간이 대략 50° CA 이상의 값을 가지고 같은 사이클에 포트 밖으로 나가게 된다. 하지만 그 이후에 유입된 낮은 온도의 엘리먼트들은 포트 내를 통과하는 동안 배기 밸브가 닫혀 다음 사이클의 배기 과정까지 머물러 있게 되며, 이때 포트 벽면으로의 열전달로 인해 온도가 떨어진다.

##### 4.2 사이클 내 탄화수소 성분 변화 특성

Fig. 5와 같이 밸브를 지나서 배출되는 탄화수소는 일반적으로 배기 밸브가 열린 초기의 높은 농도로부터 급격히 감소하여 낮은 값에서 안정됐

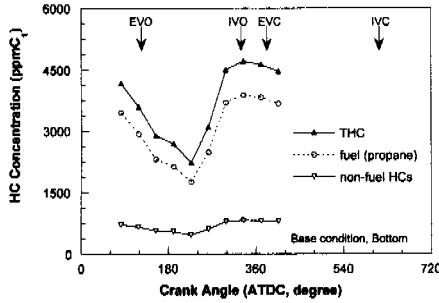


Fig. 5 Concentration changes of fuel and non-fuel HC during exhaust process at base condition. sampling location : bottom

다가 배기 밸브가 닫히기 직전에 다시 증가하여 최대값을 가지는 경향을 보이는데, 이러한 형태는 다른 연구 결과에서도 보고되고 있다. 배기 초기의 높은 탄화수소 농도의 원인은 두 가지로 생각되고 있다. 하나는, 이전 사이클에서 배출된 탄화수소가 포트내에 정체되어 남아 있으므로 탄화수소 값은 높게 나타난다. 또 하나는, 초기 블로다운 가스에는 이미 언급한 바와 같이 연소실 헤드(head) 소염 층(quenching layer)과 틈새 체적에서 비롯된 탄화수소를 포함하고 있는 것으로 생각된다.

블로다운 기간 중기 이후에는 배기 가스의 대부분을 차지하는 벌크 가스(bulk gas)가 주로 배출된다고 생각되는데, 벌크 가스는 연소실 내에서 주 연소 과정이 발생하고 고온으로 인한 2차 산화가 활발한 부분이므로 벽면 근처 소염 영역이나 크레비스 체적 등의 가스보다 탄화수소가 매우 낮기 때문에 Fig. 5에서 블로다운 기간 동안 탄화수소 농도가 계속 감소하는 것을 볼 수 있다. 이러한 탄화수소 농도의 감소는 주로 연료 성분의 감소에 의한 것을 볼 수 있으며 상대적으로 비 연료 성분의 농도는 거의 일정한 것을 알 수 있다. 이에 비하여 배제 기간 동안에는 탄화수소 농도가 급격히 상승함을 알 수 있는데, 이는 배기 과정 말기에는 연소실 벽면과 피스톤-링 크레비스(piston-ring crevice) 등에서 높은 농도의 탄화수소가 흘러나오기 때문으로 판단된다. 특히, 벽면 근처 소염 영역과 크레비스에서 나온 미연 탄화수소는 주로 벽면 주위에 주로 존재하는데 이들은 스크레이프-오프 와류에 의해 배기 과정

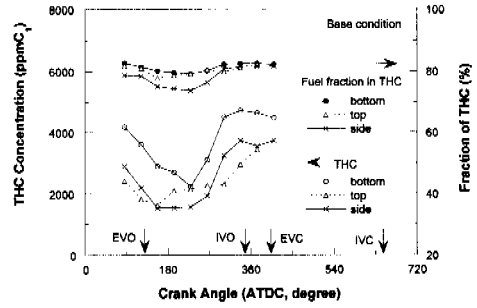


Fig. 6 Variation of THC and fuel fraction with respect to 3 sampling locations at base condition

말기에 배출되어 급격한 탄화수소의 상승을 가져오는 것으로 보인다. 그림에서 흡기 밸브 열림 이후 탄화수소 및 연료 성분의 농도가 약간 감소하는 것은 배기 역류에 의한 것으로 생각된다. 이후 배기 밸브가 닫히고 난 후 배기 포트 내에서의 유동은 정지하고 탄화수소 농도는 일정한 값을 가지게 되어 다음 사이클로 넘어가게 된다. 이러한 경향은 샘플링 위치나 운전 조건에 상관없이 공통적으로 나타났다.

기본 운전 조건에서 밸브 주위의 샘플링 지점 3곳(아래, 옆, 위)에서 측정된 탄화수소 농도 및 전체 탄화수소 중 연료 성분 비율을 Fig. 6에 크랭크 각도에 대하여 나타내었다. 전체 사이클 동안 밸브 아래쪽(bottom)에서 측정된 탄화수소 농도가 높은 것을 볼 수 있으며, 밸브 옆쪽(side)과 위쪽(top)에서 측정된 농도는 비슷한 크기를 나타내고 있다. 밸브를 통과하여 포트에 배출되는 배기 가스는 코어 가스와 벽면 근처의 크레비스 가스가 혼합되어 배출되는 것으로 생각되는데 코어 가스는 크레비스 가스에 비하여 높은 온도, 낮은 탄화수소 농도, 높은 비연료 성분의 비율로 특징지을 수 있다. Fig. 6에서 원주 방향 분포를 보면 옆(side)에서 가장 낮은 탄화수소 농도를, 아래(bottom)에서 가장 높은 농도를 나타내고 있다. 연료 성분의 비율은 옆(side)에서 가장 낮고 아래(bottom)에서 가장 높은 것을 알 수 있다. 이로부터 배기 과정 중기에 배출되는 코어 가스는 상대적으로 밸브 옆쪽을 통해서 많이 배출되는 것으로 생각된다.

또한 Fig. 6에서 배기 후반의 배제 기간 동안

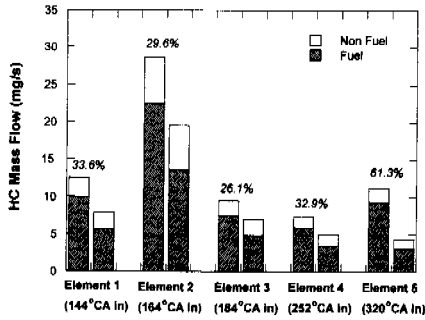


Fig. 7 HC mass flow rates through port inlet and exit of some plug elements

탄화수소 농도의 증가는 모든 샘플링 위치에서 나타나고 있으나, 아래(bottom)에서의 증가가 보다 명확하다. 여기서 탄화수소 증가가 아래(bottom)에서 옆(side), 위(top)의 순서로 나타남을 볼 수 있는데, 이는 앞에서 언급한 스크레이프-오프 와류의 영향을 나타내는 것으로 생각된다. 이 기간 동안의 연료 성분 비율은 3가지 샘플링 지점에서 거의 같은 값을 가지는데, 배기 밸브가 닫히기 직전 배출된 탄화수소의 성분 구성은 밸브 원주 방향으로 균일하며 그 탄화수소 총량에서만 차이를 가지는 것을 볼 수 있다. 이는 배기 말기에 배출되는 탄화수소는 위치에 상관없이 비슷한 과정을 거쳐 배출되는 것을 의미하는데, 벽면 근처에 있던 미연 탄화수소가 배기 과정 말기에 스크레이프-오프 와류에 의해 소염 영역을 벗어나지만 이미 낮은 코어 가스 온도로 인하여 추가적인 산화 반응 없이 밸브를 통해 배출되는 것으로 생각된다. 이때, 배기 밸브 위쪽은 아래쪽에 비하여 와류까지 거리가 멀기 때문에 탄화수소 상승이 늦게 나타날 뿐만 아니라 밸브 오버랩 기간 동안 발생하는 배기 역류의 영향을 먼저 받게 된다.

Fig. 7은 몇 개의 엘리먼트에 대하여 포트로 유입될 때와 유출될 때 탄화수소의 연료 및 비연료 성분의 변화량을 나타내고 있다. 배기 포트 입구에서의 질량 유량과 그때의 탄화수소 성분의 농도 측정값을 이용하여 한 개의 엘리먼트에서 탄화수소의 변화를 계산하였다. 이때 배기 과정 말기에 배기 포트 출구로 빠져나가지 못하고 남아있던 엘리먼트(Element 5: 320°C In)는 61.3%의 큰 탄화수소 산화량을 지니게 된다. 실제 현

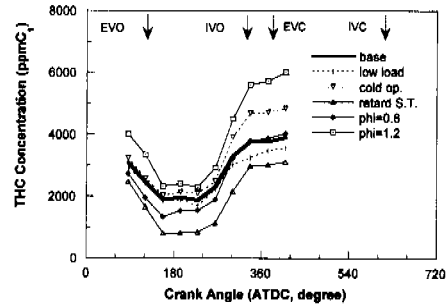


Fig. 8 Effect of engine operating conditions on total HC concentration

상에서는 블로다운 가스가 포트 내의 배기 가스 와 일부 혼합된 채 먼저 배출되기 때문으로, 배기 말에 배출된 배기 가스에 대해서 플러그 유동 모델의 적용이 곤란함을 나타내고 있다. 이는 곧 블로다운 기간 초기에 실제보다 낮은 산화율을 가지게 된다. 그러나 사이클 전체에서 모든 엘리먼트 내 탄화수소의 유입량과 유출량을 계산하여 얻어진 전체 산화율은 이러한 상반된 경향을 상쇄하는 것으로 생각된다. Fig. 7에서 볼 수 있듯이, 각 엘리먼트의 연료 성분은 포트를 지나면서 크게 감소하게 되나, 비연료 성분은 큰 변화가 없으며, 비연료 성분이 전체 탄화수소에서 차지하는 비율은 포트를 거치면서 약 10%가량 증가한다. 성분 분석 결과를 보면 연료인 프로판올 포함하는 알칸족 탄화수소들은 감소하나, 알켄족과 메탄은 증가한다. 이는 포트 입구에서 유입된 연료 성분이 2차 산화 과정을 거치면서 알켄족과 메탄으로 바뀌는 것을 의미한다.

#### 4.3 운전 조건의 영향

밸브 직후의 3가지 샘플링 위치에서의 측정값을 평균하여 얻은 전체 탄화수소의 농도를 Fig. 8에 Table 1과 같은 운전 조건에 대해서 나타내었다.

그림에서 블로다운 기간과 배제 과정 초기까지 기본 조건(1000 rpm, 제동평균유효압력 390 kPa, 냉각수온도 80°C, 연료-공기 당량비 1.0, 점화시기 MBT) 및 저부하(제동평균유효압력 80kPa), 회박 운전(연료-공기 당량비 0.8), 낮은 냉각수 온도(20°C)의 조건의 전체 탄화수소 농도가 거의 같은 값을 가지는 것을 볼 수 있다. 그밖에 당량비가

1보다 큰 농후한 운전 조건(연료-공기 당량비 1.2)에서는 이보다 높은 전체 탄화수소를, 점화시기를 지연시킨 경우(점화시기 TDC)는 낮은 전체 탄화수소 농도를 나타내고 있다.

미연 탄화수소의 배출에 대한 영향에 따라 운전 조건을 전체 배기 과정 동안 영향을 미치는 인자와 배기 과정 말기에 주로 영향을 미치는 인자로 나눌 수 있다. 전체 배기 과정 동안에 영향을 미치는 인자는 점화 시기 지연이나 농후한 당량비의 경우로서 주로 주 연소 과정에 대한 영향을 통해 탄화수소 배출 형태의 차이를 가져온다. 이에 비하여 배기 과정 말기에 영향이 큰 인자는 흡입 공기 유량이나 온도의 변화를 수반하는 것으로서 주 연소 과정에 미치는 영향은 상대적으로 작고 이보다는 벽면 근처나 크레비스 체적에서의 미연 탄화수소 발생이나 배출 과정에 주로 영향을 끼치며 저 부하, 낮은 냉각수 온도 및 희박한 공연비 등의 조건이 포함된다.

계산에 의해 배기 포트 입구와 출구에서의 유량을 얻어내었고, 이를 이용하여 각 운전 조건에서 측정된 크랭크 각마다의 탄화수소 농도 값에서 한 사이클에서의 전체 산화율을 계산하였다. 배기 포트의 입구와 출구에서 탄화수소의 연료·비연료 성분의 질량 유량을 Fig. 9에 나타내었다.

보통 탄화수소의 산화에 영향을 미치는 인자는 배기 가스의 온도와 산소 농도, 포트에서의 체류 시간을 들 수 있다. 점화 시기가 늦추어진 운전 조건에서 평균 배기 가스 온도는 기본 조건에서의 가스 온도보다 100K 정도가 높기 때문에 큰 산화율을 나타내고 있다. 또한 부하가 작거나 냉각수 온도가 낮은 경우 배기 가스 온도도 기본 조건보다 낮은 것을 볼 수 있다. 산소의 농도의 영향을 살피기 위하여 당량비가 농후하거나 희박한 조건에 대해서도 고려하였다. 이때의 배기 가스 온도는 기본 조건과 비슷하지만 산소의 농도가 탄화수소의 산화에 중요한 역할을 하리라 생각된다.

각 운전 조건에서의 산화율을 살펴보면, 배기 가스의 온도가 낮은 저부하 조건(산화율 29%)과 낮은 냉각수 온도 조건(28.8%)에서 다른 운전 조건보다 낮은 산화율을 보이고 있다. 반면에 점화 시기 지연의 경우(35.8%)에서는 다른 경우들보다 배기 가스 온도와 산화율이 높은 것을 볼 수 있는데 이것은 배기 가스의 온도가 배기 포트 내 2차 산화에 중요한 인자임을 보여준다. 또한 농후

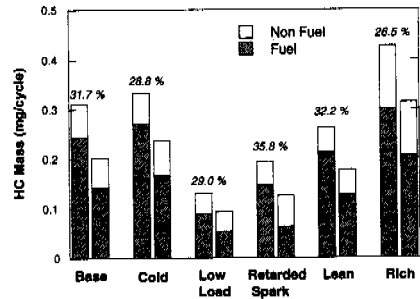


Fig. 9 Total HC mass into/out of port and total reduction according to operating conditions

한 운전 조건(26.5%)에서는 희박 운전 조건(32.2%)보다 낮은 산화율을 나타내고 있는데 이는 배기 가스 중에 포함된 산소의 농도가 적어 미연 탄화수소의 산화가 제대로 이루어지지 않았고, 이로 인하여 알켄족이나 메탄 및 아세틸렌 등의 비연료 탄화수소의 생성이 다른 운전 조건보다 많아졌기 때문으로 생각된다. 전체 탄화수소에서 차지하는 비연료 성분의 양이 다른 조건에 비해 많음을 그림을 통하여 알 수 있다.

여기서 산화율 추산에 오차의 원인으로 생각할 수 있는 것은 탄화수소 성분 농도 측정의 오차, 배기 유량 계산의 오차, 포트 입출구에서 농도 분포 가정에 의한 오차 등을 들 수 있다. 이중 포트 입출구에서 농도 분포에 대한 가정은 운전 조건에 따라 크게 달라질 수 있다. 즉, 본 연구에서는 측정 위치 사이에 균일한 농도 분포를 가정하고 유입 탄화수소 질량을 추산하였으나, 좀더 정확한 유입량을 알기 위해서는 더 정확한 샘플링 위치간 탄화수소 분포가 필요하다고 생각된다. 이는 조밀한 지점에서 샘플링을 수행하거나 연소실과 배기 포트를 동시에 탄화수소 생성 및 배출 과정 전반에 대하여 수치 해석적 방법을 통하여 이루어질 수 있다.

## 5. 결 론

(1) 배기 가스 내 탄화수소는 주로 연료 성분(프로판)으로 구성되어 있으며 연료 성분의 농도는 블로다운 기간에 낮아졌다가 배기 과정 말기에 높아지며 연료 성분을 제외한 다른 성분의 농

도는 배기 과정 동안 거의 일정하였다. 배기 벨브 주위로 탄화수소 성분의 불균일한 분포가 존재함을 확인하였으며, 이는 미연 탄화수소의 연소실 내 발생 구조와 더불어 배기 유동 등 배출 과정에 의해 결정되는 것으로 나타났다.

(2) 전체 탄화수소 중 비연료 성분의 비율은 포트 입구에서 출구까지 10% 가량 증가하며 이는 상당한 2차 산화가 일어남을 의미한다. 이러한 성분의 변화는 포트 내 산화 과정에 수반되며 온도와 산소 농도에 크게 영향을 받는다.

(3) 배기 벨브 직후의 탄화수소 배출물은 점화 시기를 늦춘 경우와 농후한 당량비 조건에서 전반적으로 크게 변화한다. 이를 제외한 다른 운전 조건(회박 운전, 저부하, 낮은 냉각수 온도 등)은 벽면 근처나 크레비스 체적에서의 미연 탄화수소 발생이나 배출 과정을 통하여 탄화수소 배출에 영향을 준다.

(4) 대부분의 포트 내 탄화수소 산화 반응은 블로다운 기간 및 초기 배제 기간에 일어나며, 측정된 농도와 유동 모델로부터 구한 탄화수소 질량 산화율은 엔진 운전 조건에 따라 26%~36%를 나타냈으며 점화 시기 지연이나 회박 운전의 경우 높은 산화율을 나타냈다.

### 참고문헌

- (1) Heywood, J. B., 1988, *Internal Combustion Engine Fundamentals*, McGRAW-HILL, pp. 147~149, 601~619.
- (2) Cheng, W. K., Hamrin, D., Heywood, J. B., Hochgreb, S., Min, K., and Norris, M., 1993, "An Overview of Hydrocarbon Emissions Mechanisms in Spark-Ignition Engines," *SAE Paper No.* 932708.
- (3) Kayes, D. and Hochgreb, S., 1996, "Development of a Time and Space Resolved Sampling Probe Diagnostic for Engine Exhaust Hydrocarbons," *SAE Paper No.* 961002.
- (4) Kayes, D. and Hochgreb, S., 1997, "Time, Space, and Species Resolved Measurements of Engine-Out Hydrocarbon Emissions from Spark-Ignited Engines," *Combust. Sci. and Tech.*, Vol. 127, pp. 333~362.
- (5) Sodr , J. R., Yates, D. A., 1997, "Species and Time-resolved Measurements of Exhaust Hydrocarbons from a SI Engine," *SAE Paper No.* 971016.
- (6) Thompson, N. D. and Wallace, J. S., 1994, "Effect of Operating Variables and Piston and Ring Parameters on Crevice Hydrocarbon Emissions," *SAE Paper No.* 940480.
- (7) Kaiser, E. W., Siegl, W. O., and Anderson, R. W., 1994, "Fuel Structure and the Nature of Engine-Out Emissions," *SAE Paper No.* 941960.
- (8) Siegl, W. O., Richert, J. F. O., Jensen, T. E., Schuetzle, D., Swarin, S. J., Loo, J. F., Prostack, A., Nagy, D., and Schlenker, A. M., 1993, "Improved Emissions Speciation Methodology for Phase II of the Auto/Oil Air Quality Improvement Research Program - Hydrocarbon and Oxygenates," *SAE Trans.*, Vol. 102, Paper No. 930142.
- (9) Caton, J. A. and Heywood J. B., 1980, "Models for Heat Transfer, Mixing and Hydrocarbon Oxidation in a Exhaust Port of a Spark-Ignited Engine," *SAE Paper No.* 800290.
- (10) Lienesch, J. H., 1979., "A Gas Exchange Submodel for the New, Single Cylinder General Motors Research Laboratories Engine Simulation Program," G. M. research Report, EN-142.