

〈논문〉 SAE NO. 2000-03-0026

프로판 엔진의 배기 포트에서 탄화수소 산화 예측을 위한 모델링

Prediction Modeling of Unburned Hydrocarbon Oxidation in the Exhaust Port of a Propane-Fueled SI Engine

이형승*, 박종범*, 최희명**, 민경덕***, 김용서***
Hyung-Seung Yi, Jongbum Park, Hoimyong Choi, Kyoungdoug Min, Eungseo Kim

ABSTRACT

In order to investigate the exhaust structure and secondary oxidation of unburned hydrocarbon (HC) in the exhaust port, a numerical simulation was performed with 3-dimensional flow model and oxidation mechanism optimized for port oxidation.

To predict the exhaust and oxidation process with consideration of flow, mixing, and temperature, 3-dimensional flow model and HC oxidation model were used with a commercial computational program, STAR-CD. The flow model were with moving grid for valve motion, which could predict the change of flow field with respect to valve lift. Optimization was performed to predict the HC oxidation with temperature range of 1200~1500K, low HC and oxygen concentration, existence of intermediate species, as typical in port oxidation. The constructed model could predict the port oxidation process with oxidation degree of 14~48% according to the engine operating conditions.

주요기술용어 : Hydrocarbon (탄화수소), Secondary oxidation(2차 산화), Degree of oxidation(산화율), 3-dimensional flow model(3차원 유동 모델), 4-step oxidation model(4 단계산화 모델)

1. 서론

자동차가 도시 지역 대기 오염의 주된 원인으

로 부상함에 따라 배기 가스에 대한 규제가 강화되는 추세에 있다. 배출 규제를 만족시키기 위한 저감 기술의 개발을 위해서는 유해 배출물 발생 및 배출 구조를 이해하는 것이 필수적이다. 유해 배출물의 하나인 미연 탄화수소는 팽창 과정에서 실린더 내의 압력이 감소하면 연소실 안으로 들어가서 고온의 기연 가스와 혼합되고, 팽창 행정 말기와 배기 과정 중에 연소실이나 배기관에서 2

* 회원, 서울대학교 정밀기계설계
공동연구소

** 회원, 서울대학교 대학원

*** 회원, 서울대학교 기계항공공학부

차 산화 과정(late-cycle burn-up)을 겪는 것으로 알려져 있다.^{1,2)} 이러한 2차 산화는 일산화탄소 및 이산화탄소로의 산화 반응뿐 아니라 열합성(thermal synthesis)이나 열분해(pyrolysis) 등의 변환 과정을 포함한다.

최근의 실험 결과에 의하면, FTP-75 테스트 전체(약 23분)의 탄화수소 배출물 중 70%가 처음 200초 동안에 발생하는 것으로 나타났다.^{3,4)} 이 엔진 시동 및 예열 기간에는 안정된 시동을 위해 혼합기를 농후하게 유지할 뿐만 아니라 낮은 배기 온도로 인하여 촉매 변환기가 미처 활성화되지 못한 상태에 있다. 이 기간에 엔진에서 배출된 탄화수소는 배기 포트 내의 2차 산화 과정에 의해서만 제거될 수 있는 것으로 생각된다.

포트 내의 탄화수소 산화 과정에 대한 수치 해석적 접근은 Caton⁵⁾과 Wu^{6,7)}등에 의해 시도되었다. Caton은 배기 포트내 유동을 플러그 유동으로 가정하고 단순한 1-단계 산화 모델을 사용하여 수치해석을 수행하였고, 이를 바탕으로 최근에는 상세 화학 반응 모델(full chemical kinetic model)을 사용하고 플러그 요소(plug element) 내의 온도 및 열 경계 층을 가정하여 성층 효과를 고려하고자 한 연구가 있었다. 그러나, 이들은 밸브 운동에 의한 유동 형태의 변화를 고려할 수 없고, 특히 배기 초기의 높은 유속에 의한 혼합을 제대로 해석할 수 없기 때문에 실제 포트 내 산화 및 배출 과정에 대한 예측이 곤란한 것으로 생각된다.

본 연구의 목적은 배기 과정 동안의 산화 과정을 정량적으로 예측할 수 있는 수치 해석적 모델을 구성하는데 있다.

밸브 운동을 고려할 수 있는 3차원 메시를 구성하여 배기 포트 내 유동 및 열전달, 산화 과정에 대하여 수치해석을 수행함으로써 탄화수소 산화 과정에 대한 예측 가능성을 살펴보았다. 이를 위한 산화 모델로 기존의 4-단계 모델을 배기 포트 내 산화 과정을 해석하는데 적합하도록 전 화학 반응 모델에 따라 모델의 계수를 최적화 하였다. 수정된 산화 모델을 통하여 1200K 이상의 온

도 조건과 낮은 탄화수소 및 산소 농도, 연소 중간 생성물의 존재 등 배기 포트 내 산화 과정의 대표적인 조건에서 산화 과정을 예측할 수 있도록 하였다. 또한, 실험에 사용된 엔진의 배기 밸브 리프트에 따라 운동하는 3차원 메시를 사용함으로써 유동 형태와 이에 따른 혼합, 열전달 및 산화 과정을 예측할 수 있도록 하였다. 이로부터 밸브 운동에 의한 유동 변화 특성과 입구 및 벽면에서의 경계조건이 유동 및 열전달과 산화 과정에 미치는 영향을 파악하였다. 이러한 모델을 통하여 포트 내 2차 산화 과정의 예측 가능성을 확인하였으며, 엔진의 운전 조건이 포트 내 산화 과정에 미치는 영향을 평가하였다.

2. 모델링

2.1 유동 및 열전달 모델링

본 연구에서는 실제 배기 포트 형상을 가지는 3차원 메시를 구성하였고, 특히 블로다운 기간 동안의 밸브 운동과 관련된 복잡한 유동 형태에 대한 정확한 해석을 위하여 이동 그리드(moving grid) 기법을 도입하였다. 이와 더불어 상용 유동 해석 패키지로 많이 이용되는 STAR-CD를 이용하여 비정상 압축성 난류 유동을 열전달 및 각 성분의 전달 방정식과 연립하여 해석하였다.

배기 포트 내의 유동 형태를 수직 대칭으로 가정하여 포트 내 체적의 절반에 대하여 구성된 메시는 직육면체 형태의 셀 6800개로 구성되며 대표적 셀의 크기는 약 2mm이다. Figure 1은 구성된 메시를 나타낸 그림이다.

배기 밸브 운동의 영향을 고려하기 위하여 배기 밸브 근처 셀의 각 꼭지점 위치를 변화시켰다. 각 시간 단계마다 각 점의 위치에 대한 좌표를 밸브 리프트에 따라 수정하여 밸브 운동을 모사하였다. 밸브 리프트가 매우 작은 경우 셀의 형태가 지나치게 왜곡되어 정상적인 유동 계산이 곤란하므로 최소 밸브 리프트를 0.5mm로 하여 메시의 위치를 설정하였다.

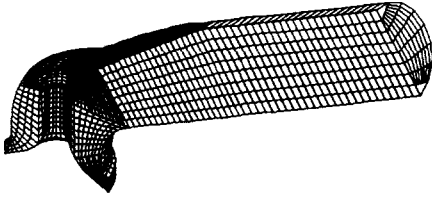


Fig. 1 Computational mesh grid of exhaust port

2.2 경계 조건

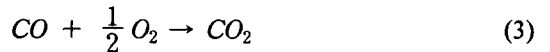
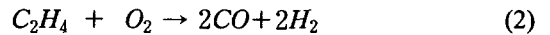
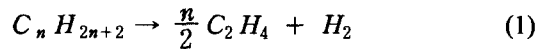
포트 내의 유동 및 열전달, 농도의 해석에 가장 큰 영향을 미치는 것은 배기 밸브를 거쳐 포트에 유입되는 배기 가스의 유속 및 온도, 각 탄화수소의 농도 등에 대한 입구 조건이다. 본 연구에서는 몇 가지 가정을 통하여 포트 입구에서의 온도 및 유속을 추정하여 이를 온도 및 유동장의 입구 조건으로 하고, 측정된 농도를 입구 조건으로 사용하여 전체 계산을 수행하였다.

3영역 사이클 해석을 통하여 매 크랭크 각도에서의 연소실 내 각 영역의 질량과 온도를 계산하였고, 이로부터 배기 과정이 시작되면 배기 밸브를 통과하여 포트에 나가는 배기 가스의 질량을 계산하였다. 포트 입구에서의 유속 분포가 원주 방향으로 균일하며 입구 유동은 밸브 중심을 향하는 밸브 시트에서의 접선 방향으로 유입된다고 가정하였으며 이로부터 밸브를 통해 포트에 유입되는 유속을 결정하였다. 입구 영역을 3부분으로 나누어서 밸브 옆(side), 위(top), 아래(bottom)의 각 샘플링 위치에서 측정된 탄화수소 농도를 경계조건으로 사용하였다. 포트 중심 면에 대한 유동 형태의 대칭 가정으로부터 입구 면적의 50%를 밸브 옆 조건, 25%씩을 밸브 위 및 아래 샘플링 위치에서 측정된 농도를 사용한 영역에 할당하였고 각 영역을 밸브 리프트 방향으로 두 부분으로 나누어 연소실 내 기연 단열 영역의 온도와 기연 경계 영역의 온도를 적용하였다. 즉, 3가지 농도 조건과 2가지 온도 조건으로 전체 6개

입구 영역으로 나누었으며 각 영역 내에서 농도 및 질량 유량이 균일하다고 가정하였다. 밸브 리프트 방향으로의 영역 구분은 연소실 내 사이클 해석을 통하여 기연 단열 영역과 경계 영역의 질량비를 기준으로 나누었고 본 연구에서는 전체 입구 면적의 37.5%를 기연 단열 영역의 온도를 적용하였다. 입구 조건의 각 영역에서 균일한 유속 및 온도, 농도는 배기 과정 동안 시간에 대하여 변화하며, 이는 앞에서 설명한 사이클 해석에 의해 계산된 연소실 내 상태와 같다고 가정하였다.

2.3 산화 반응 모델

Hautman이 제안한 4단계 모델은 연료의 열분해, 중간 생성물의 산화, CO 및 O₂의 산화 반응을 나타내는 다음의 네 가지 반응식과 각 반응률에 대한 모델링으로 구성된다.⁸⁾



$$\frac{d[C_n H_{2n+2}]}{dt} = -10^x \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) [C_n H_{2n+2}]^a [O_2]^b [C_2 H_4]^c \quad (5)$$

$$\frac{d[C_2 H_4]}{dt} = -10^x \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) [CH_4]^a [O_2]^b [C_n H_{2n+2}]^c \quad (6)$$

$$\frac{d[CO]}{dt} = \left\{ -10^x \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) [CO]^a [O_2]^b [H_2O]^c \right\} \times S \quad (7)$$

$$S = \min(7.93 \exp(-2.48\phi), 1) \quad (8)$$

$$\frac{d[H_2]}{dt} = -10^x \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) [H_2]^a [O_2]^b [C_2 H_4]^c \quad (9)$$

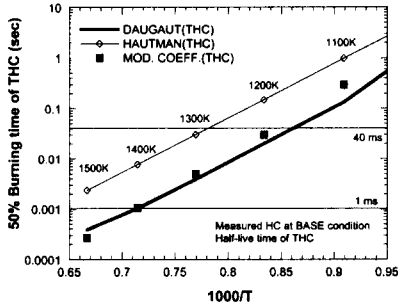


Fig. 2 50% burning times of total HC at base condition ; 1000 rpm, IMEP 550 kPa, coolant temperature 80°C, equivalence ratio 1.0, and initial mole fraction of oxygen = 1.0%

배기 포트 내에서 탄화수소 산화 반응이 일어나는 온도는 1200~1500K 정도로 생각되며, 포트에 유입되는 배기 가스의 미연 탄화수소는 2000~7000 ppmC1 (물분율 0.00067~0.00133) 정도로 생각된다. Fig. 2는 기본 운전 조건에서의 포트 입구의 탄화수소 농도 초기 조건과 등은 과정에서 50% 산화 시간을 온도 범위 1000~1500K에 대하여 산화 메커니즘에 따라 나타낸 그림이다. 그림에서 Dagaut⁹⁾의 상세 화학 반응 모델(detailed chemical reaction mechanism) 및 Hautman⁸⁾ 모델에 의해 계산된 산화 시간을 온도에 따라 볼 수 있으며, 시간 스케일로 볼로다운 가스의 1000 rpm에서의 포트 체류 시간 1 ms와 배기 밸브 열림 기간 40 ms가 표시되어 있다. 그림에서 상세 화학 반응 기구의 결과에서 보면, 배기 밸브가 열린 동안 50% 이상의 산화가 일어나려면 1200K 이상의 온도가 필요함을 알 수 있으며, Hautman 모델이 상세 화학 반응 기구에 비해 50% 산화 시간을 10배 가량 크게 예측하는 것을 볼 수 있다. 실제 현상을 가장 정확하게 기술할 수 있는 것은 상세 화학 반응 기구를 사용한 모델로 생각되지만, 3차원 형상의 모델과 상세 화학 반응 모델을 함께 사용하는 경우, 그 계산 시간이 지나치게 커져서 현실적으로 계산이 불가능

하다.

Hautman 모델의 계수를 최적화 하여 실제 산화 과정을 잘 예측하는 것으로 생각되는 Dagaut의 상세 화학 반응 모델과 부합하는 결과를 얻고자 하였다. 모델 계수의 최적화는 두 모델의 50% 산화 시간의 차이를 최소로 하도록 최대 경사 탐색법(steepest descent method)을 사용하여 20개 계수 모두를 최적화 하였다. Hautman 모델에 비하여 수정된 모델이 높은 온도와 낮은 농도 조건에서 탄화수소 산화 과정을 좀더 정확히 예측하는 것으로 생각된다. 수정된 계수를 사용한 4단계 산화 모델을 사용하여 배기 포트 내 탄화수소 산화 과정을 해석하였다.

3. 결과 및 검토

3.1 기본 조건

포트 내 산화 반응은 국부 온도에 매우 민감하므로 포트 내 온도 분포를 살펴보았다. 계산된 온

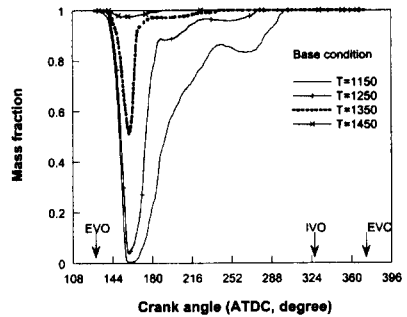


Fig. 3 Mass fraction corresponding to temperature range at base condition ; 1000rpm, IMEP 550 kPa, coolant temperature 80°C, equivalence ratio 1.0, and initial mole fraction of oxygen = 1.0%

도 분포로부터 몇 개의 온도 범위에 속하는 유체의 질량 분율을 Fig. 3에 나타내었다. 온도 범위는 1150K, 1250K, 1350K, 1450K를 경계로 하여

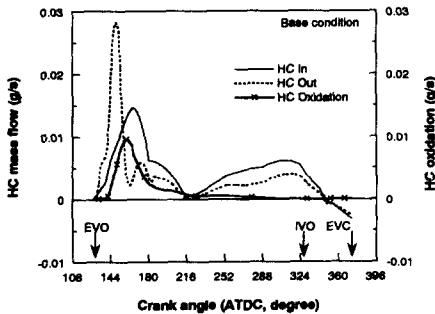


Fig. 4 Calculated HC in/out mass flow and oxidation during exhaust process at base condition ; 1000 rpm, IMEP 550 kPa, coolant temperature 80°C, equivalence ratio 1.0, and initial mole fraction of oxygen = 1.0%

5개로 나누었고 기본 조건에서 각 범위 내의 질량 분율의 변화를 그림에 나타내었다.

블로다운 기간에(EVO부터 TDC까지) 대부분의 포트 내 가스 질량이 1250K 이상의 온도 범위에 속하고, 특히 150° CA 근처에서는 약 50%의 질량이 1350K 이상의 온도를 가지는 것을 볼 수 있다. Figure 2에서 50K 이상의 온도에서 50% 산화에 필요한 시간은 10ms 이하, 1350K 이상에서는 3ms 이하로 되는 것을 볼 수 있다. 이는 1000 rpm에서 60° 및 18°로서 산화에 충분한 온도 및 시간 조건이 주어져 있음을 볼 수 있다. 따라서 이 블로다운 기간의 탄화수소 산화는 활발히 일어날 것으로 생각된다. 이후의 배제(displacement) 기간 동안에는 온도가 급격히 떨어져서, 216° CA 이후 1150K~1250K의 분율은 10~20%, 1250K~1350K의 분율은 0~5%를 차지하는 것으로 나타났다. 이 온도에서는 산화 과정이 느리기 때문에 전체 산화에서 차지하는 부분이 적을 것으로 생각된다.

포트 계산 영역으로 유출입되는 전체 탄화수소의 질량 유량과 계산 영역 내에서 생성되는 탄화수소의 양을 Fig. 4에 나타내었다. 유입 및 유출 탄화수소 질량 유량은 입구 및 출구 단면에서 배

기 가스 질량 유량과 탄화수소 농도 곱의 총합으로 나타낸 것이다. 전체 유입 탄화수소 질량중 31.5%가 포트 내에서 산화된 것으로 나타났다. 대부분의 산화가 블로다운 기간에 발생한 것을 확인할 수 있다.

기본 운전 조건에서 전형적인 유동장 및 온도장, 농도장을 Fig. 5에 나타내었다.

먼저 배기 초기의 블로다운 기간 동안 배출된 배기 가스는 밸브 스템을 따라서 포트 윗 벽면에 도달한 후 옆 벽면을 따라 아래로 흐른다. 블로다운 초기에는 배기 가스의 속도가 180m/s에 달하는데, 이로 인하여 포트 중간 단면에서의 온도 분포가 바깥 벽면을 따라 높은 양상이 나타나고 있다. 이 기간 동안의 유동은 블로다운 가스와 포트 내의 고농도 탄화수소와의 혼합 과정에 큰 영향을 미치게 된다. 여기서 Fig. 5의 72° ABDC 그림에서 포트 윗 벽 쪽과 아래쪽 벽면에서 낮은 탄화수소 농도를 나타내는 것을 볼 수 있는데 이는 유동에 의해 포트 옆쪽 벽면을 따라 고온 영역이 형성되고 이 부분에서 산화 반응이 일어난 것으로 생각된다.

배기 밸브 리프트가 커지고 유속이 작아지면서 배제 기간이 되면, 포트 내 유동 분포가 균일해지고 포트 중심 쪽에서 높은 온도를 가지게 된다.

한편, 배기 밸브가 닫힌 이후 벽면으로의 열전달이 계속되어 다음 배기 과정 때까지 기본 조건에서 약 200K의 온도가 하락하는 것으로 나타났다. 이 기간 동안에는 400~600K 가량의 온도를 가지며 산화 반응은 거의 일어나지 않는 것으로 생각된다.

3.2 입력 조건의 영향

입력 조건중 배기 가스의 온도, 산소 농도, 벽면으로의 열전달 계수가 탄화수소의 산화에 미치는 영향을 Fig. 6에 나타내었다.

배기 가스의 온도는 블로다운 기간중의 탄화수소 산화에 큰 영향을 준다. 배기 가스의 온도가 100K 증가할 경우, 탄화수소의 산화율은 50.4%

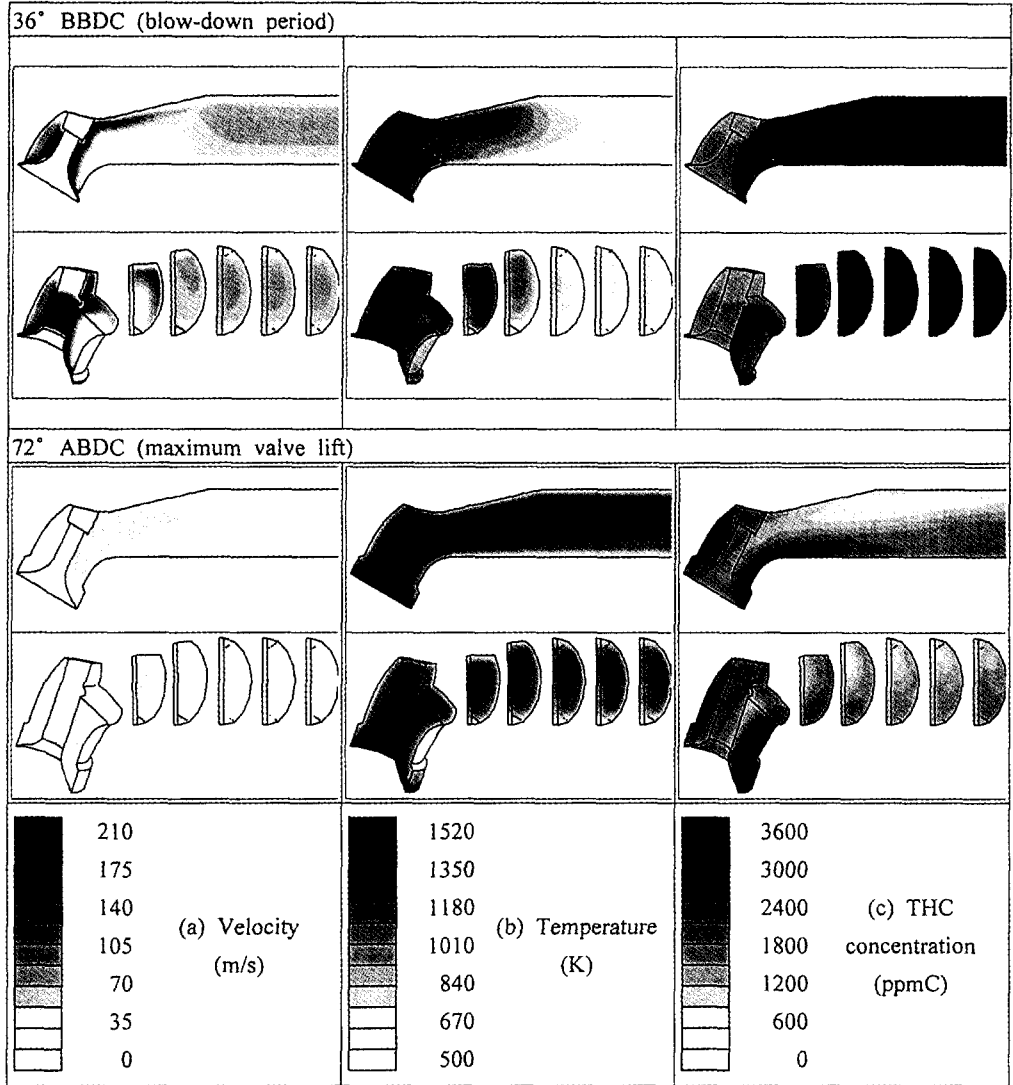


Fig. 5 Distribution of velocity, temperature, and THC during blow-down period and maximum valve lift at base condition ; 1000 rpm, IMEP 550 kPa, coolant temperature 80°C, equivalence ratio 1.9, and initial mole fraction of oxygen = 1.0% ; (a) velocity (b) temperature (c) THC

가 되었고, 100K 감소할 경우 18%가 되었다. 배기가스중 산소 농도가 1%에서 1.3%로 증가할 경우 탄화수소의 산화율은 31.5%에서 36.5%로 변화하였으며, 증가의 대부분은 블로다운 기간에 일어났다. 포트 벽면을 단열로 가정할 경우, 배기가스의 온도가 100K 정도 상승한 경우와 유사한

효과를 나타내었다.

배기가스의 온도가 탄화수소의 산화에 가장 큰 영향을 주며, 배기 포트에서의 산화를 예측하는 과정에서 정확한 배기가스 온도의 측정 또는 예측이 매우 중요하다.

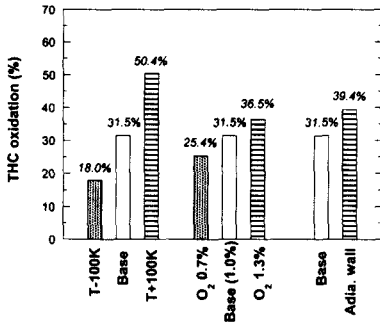


Fig. 6 Effect of input condition on calculated HC oxidation degree ; temperature, mole fraction of oxygen, and wall condition

3.3 운전 조건의 영향

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 계산을 수행하였다.

Table 1 Matrix of Test Conditions

Base	1000 rpm, 550kPa imep, coolant temp. 80 °C, $\phi=1.0$, spark timing MBT
Cold Coolant	coolant temperature 20 °C
Low load	imep 280kPa
Retarded spark	spark timing TDC
Lean	$\phi=0.8$
Rich	$\phi=1.2$

계산된 사이클당 탄화수소 유입 질량과 유출 질량을 Fig. 7에 운전 조건에 따라 표시하였으며, 연료 성분(C₃H₈)과 비연료 성분(C₂H₆)을 구별하여 나타내었다. 그림에서 왼쪽 막대는 탄화수소 유입 질량을 나타내고, 오른쪽 막대는 유출 질량을 나타내며, 그 차이가 산화된 질량을 의미한다.

연료-공기 당량비의 변화는 배기가스 온도뿐만 아니라 산소 농도와 탄화수소 농도에도 영향

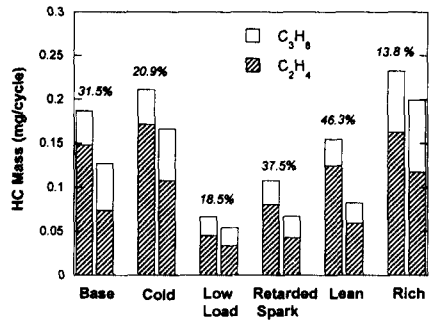


Fig. 7 Effect of engine operating condition on calculated HC oxidation degree; base, cold : coolant temperature 20 °C, low load : IMEP 220 kPa, retarded spark timing : TDC, lean : equivalence ratio 0.8, and rich condition : equivalence ratio 1.2

을 미친다. 혼합기가 농후한 조건일 경우 산소 농도의 부족으로 탄화수소의 13.8%정도만 산화된다. 저부하 조건에서는 배기가스의 온도가 낮고, 배기가스의 유량이 작으며, 배기가스의 역류가 크게 일어난다. 또한 블로다운 기간의 가스 온도는 포트에서 탄화수소를 산화시키기에는 너무 낮다. 따라서 탄화수소는 겨우 18.5%만이 산화된다. 그러나 실린더에서 배출되는 탄화수소의 양이 정상 운전 조건의 35%에 불과하다. 점화시기가 지연된 경우, 배기가스의 온도가 높아져서 연소실내의 2차 산화가 활발하여 포트에 유입되는 탄화수소의 양이 기본조건의 58%정도에 불과하다. 또한 고온으로 인하여 블로다운 기간중 산화가 활발하여 포트를 벗어나는 탄화수소의 질량이 훨씬 적다. 냉각수 온도가 80°C에서 20°C로 변화할 경우, 배기과정 초기와 배기과정 중반이후 말기까지 포트에서의 평균 가스 온도는 20°C, 50~70°C정도 감소한다. 낮은 연소실 벽면 온도로 인하여 연소실내 2차 산화가 덜 일어나므로 포트에 유입되는 탄화수소 질량이 기본 조건에 비해 13%가량 증가하였다.

4. 결 론

실제 배기 포트 및 밸브 형상에 따라 구성된 3차원 계산 격자와 밸브 운동을 모사할 수 있는 이동 그리드 기법을 사용하여 유동 모델을 구성하였고, 배기 포트 내 산화 과정에 적합한 산화 모델을 마련하였다. 측정된 탄화수소 농도와 사이클 해석에 의한 입구 조건으로부터 포트 내 2차 산화 과정에 대하여 수치 해석을 수행하였다.

1) 포트 내 산화 과정 해석을 위해서는 1200~1500K의 온도 범위와 2000~7000 ppmC1, 비연료 성분의 비율 20~30% 등의 조건에 적합한 모델이 필요하며, 이를 위해서 상세 화학 반응 모델의 산화 과정에 따라 기존 4-단계 모델의 계수를 최적화하여 산화 모델을 구성하였다.

2) 밸브 운동을 고려한 3차원 모델을 통하여 배기 포트에서의 유동 특성, 온도, 탄화수소 농도의 분포를 예측할 수 있었다.

3) 배기가스 온도가 탄화수소의 산화에 가장 큰 영향을 주며, 배기포트에서의 탄화수소 산화를 예측하는 과정에서 정확한 배기가스 온도의 설정이 매우 중요하다.

4) 운전 조건을 변화시킬 경우, 배기포트내 탄화수소의 산화율이 13.8%에서 46.3%까지 변화하는 것으로 예측되었다.

참 고 문 헌

- 1) Heywood, J. B., *Internal Combustion Engine Fundamentals*, pp. 147-149, 601-619, McGRAW-HILL, 1988.
- 2) Cheng, W. K., Hamrin, D., Heywood, J. B., Hochgreb, S., Min, K., and Norris, M., "An Overview of Hydrocarbon Emissions Mechanisms in Spark-Ignition Engines", SAE Paper No. 932708, 1993.
- 3) Sterlepper, J., Neuber, H., and Ruhland, H., "HC-Emissions of SI Engines - Optical

Investigation of Flame propagations in Piston Top Land Crevice", SAE Trans., Vol. 103, Paper No. 941994, 1994.

- 4) Takeda, K., Yaegashi, T., Sekiguchi, K., Saito, K., and Imatake, N., "Mixture Preparation and HC Emissions of a 4-Valve engine during Cold Starting and Warm-Up", SAE Trans., Vol. 104, Paper 950074, 1995.
- 5) Caton, J. A. and Heywood J. B., "Models for Heat Transfer, Mixing and Hydro-carbon Oxidation in a Exhaust Port of a Spark-Ignited Engine", SAE Paper No. 800290, 1980.
- 6) Wu, K. and Hochgreb, S., "Chemical Kinetic Modeling of Exhaust Hydrocarbon Oxidation", Combust. Flame, Vol. 100, pp. 193-201, 1995.
- 7) Wu, K. and Hochgreb, S., "Chemical Kinetic Simulation of Hydrocarbon Oxidation Through the Exhaust Port of a Spark Ignition Engine", Combust. Flame, Vol. 107, pp. 383-400, 1996.
- 8) Hautman, D. J., Dryer, F. L., Schug, K. P., and Glassman I., "A Multiple-step Overall Kinetic Mechanism for the Oxidation of Hydrocarbon", Combust. Science & Technology, Vol.25, pp.219-215, 1981.
- 9) Dagaut, P., Cathonnet, M., Boettner, J. C., and Gaillard, F., "Kinetic Modeling of Propane Oxidation", Combust. Science and Technology, Vol.56, pp.23-63, 1987.
- 10) Drobot, K., "Hydrocarbon Oxidation in the Exhaust Port and Runner of a Spark Ignition Engine", MS Thesis, M. I. T., February 1994.