



다양한 연료의 EGR 성능개선에 관한 기초연구 (Part I: 메탄/air 예혼합화염에서 RG의 첨가효과)

황철홍 · 탁영조* · †이창언

인하대학교 기계공학과, *인하공업전문대학 자동차과
(2007년 4월 27일 접수, 2007년 8월 6일 채택)

Fundamental Study on the Development of the EGR Efficiency (Part I: Effects of Reformer Gas Addition in CH₄/air Premixed Flames)

Cheol-Hong Hwang · Young-Jo Tak* · †Chang-Eon Lee

Dept. of Mechanical Engineering, Inha University, Incheon 402-751, Korea
*Dept. of Automotive Engineering, Inha Tech. College, Incheon 402-752, Korea
(Received 27 April 2007, Accepted 6 August 2007)

요 약

CH₄/air 예혼합화염에서 EGR 성능개선을 위한 RG의 첨가효과에 대한 수치적 연구가 수행되었다. 일반적으로 EGR은 화염온도 및 NO_x 저감을 위해 사용되어지는 반면, RG는 연소속도와 같은 화염안정성 개선을 위해 사용되어질 수 있다. 본 연구는 이들 두 첨가제가 연소특성에 미치는 경쟁적인 효과에 초점이 맞추어졌다. 결론으로서, 적절한 EGR 및 RG 첨가율의 조절은 낮은 NO_x 배출의 달성과 동시에 순수 CH₄/air 예혼합화염과 동일한 화염 안정성을 얻을 수 있음을 확인하였다.

Abstract – In this study, the effect of reformer gas(RG) on the performance development of the exhaust gas recirculation(EGR) was investigated numerically in CH₄/air premixed flame. Typically EGR is used to reduce the flame temperature and NO_x emission, whereas RG can be used to improve the flame stability, such as burning velocity. This competitive relationship is focused in this study. As a result, it can be identified that the adjustments of EGR and RG ratio can achieve the low NO_x emission and the similar flame stability to pure CH₄/air premixed flame simultaneously.

Key words : EGR(Exhaust gas recirculation), Reformer gas(RG), NO_x, Burning velocity

I. 서 론

자동차, 산업용 연소기 및 가스터빈 엔진에서 NO_x 발생을 저감시키기 위한 대표적인 방법으로는 배기가스 재순환(Exhaust gas recirculation: EGR), 다단(Multi-staged) 연소, 촉매연소 등이 제안되고 있다. 이중 가장 일반적으로 사용되는 EGR은 배기가스의 재순환을 통해 화염온도를 낮추어 주로 화염하류에서 생성되는 Thermal NO_x 생성을 억제하는 방식이다[1,2]. 이러한 EGR은 초기 연료 및 공기가 개별적으로 공급되는 비예혼합화염(Non-premixed flame)에 주로 적용되어 상

당한 NO_x 저감을 구현할 수 있다. 그러나 최근 엄격한 환경규제로 인하여 비예혼합 연소방식이 아닌, 연료와 공기가 미리 혼합된 예혼합 연소방식에 대한 시도가 점차 증가되고 있다[3]. 예혼합화염(Premixed flame)은 화염길이가 짧아서 콤팩트한 연소기의 설계가 가능하며, 당량비 제어를 통해 화염온도의 조절이 용이하고, Soot 및 NO_x와 같은 오염물질의 배출지수가 낮은 매우 유용한 연소방식이라 할 수 있다. 그러나 초저NO_x 연소를 위한 예혼합화염에 EGR의 적용은 연소속도의 저감 등과 같은 비예혼합화염에서 나타나지 않은 화염 불안정성의 문제점을 가지고 있다. 추가로 열손실의 증가, 낮은 연소효율 및 점화성능 저하 등의 문제를 초래할 수 있다[4]. 이러한 문제점을 해결하기 위하여, 최근에

†주저자: chelee@inha.ac.kr

는 연료에 H₂를 첨가하여 연소속도를 증가시키는 연구들이 진행되고 있다[5]. 더불어 수소의 생산, 이동 및 저장 등의 어려움을 해결하기 위하여 촉매를 이용한 수증기 개질(Steam reforming) 및 부분산화(Partial oxidation) 등에 관한 많은 연구들이 진행되고 있다[6]. 다양한 개질과정을 통해 탄화수소 연료에서 변환된 개질 가스(Reformer gas; RG)는 주로 H₂와 CO로 구성되어 있으며, 비용, 효율 및 연료질의 개선을 위해 많은 연료 개질 연구들이 수행되고 있다. RG를 이용한 EGR의 성능개선에 관한 최근 연구로는 Han 등[7]에 의해 RG 첨가율에 따른 연소속도의 측정 및 예측이 수행된 바 있다. 그러나 EGR의 주요 목적인 NO_x 저감 및 RG의 첨가로 인한 화염안정성 개선과 관련된 연소특성들의 경쟁관계의 관점에서 EGR과 RG의 첨가율의 제어에 따른 최적 연소조건을 고찰한 연구는 찾아보기 어렵다.

이러한 배경 하에 본 연구에서는 EGR 성분변화가 화염온도, 연소속도 및 NO_x 배출에 미치는 화학적 효과를 우선적으로 검토하였다. 또한 이들의 효과를 극대화시키기 위한 RG의 활용측면에서 EGR과 RG 혼합가스의 연소특성에 대한 종합적인 평가를 통해 최적 EGR 및 RG 첨가율을 제안하고자 한다. 마지막으로 RG가 연소속도에 미치는 보다 구체적인 원인을 상세 반응기구를 이용한 민감도 해석(Sensitivity analysis)을 통해 규명하고자 한다.

II. 수치해석 방법

2.1. 지배방정식 및 경계조건

본 계산은 1차원 자유전파 예혼합화염을 대상으로 하였으며, 지배방정식으로서 연속, 화학종, 에너지 및 상태방정식은 각각 다음과 같다.

$$\dot{M} = \rho uA \quad (1)$$

$$\dot{M} \frac{dY_k}{dx} = -\frac{d}{dx}(\rho A Y_k V_k) + A \dot{\omega}_k W_k \quad (2)$$

(k = 1, 2, ..., K)

$$\dot{M} \frac{dT}{dx} = \frac{1}{c_p} \frac{d}{dx} \left(\lambda A \frac{dT}{dx} \right) - \frac{A}{c_p} \sum_{k=1}^K \rho c_{p,k} Y_k V_k \frac{dT}{dx} - \frac{A}{c_p} \sum_{k=1}^K \dot{\omega}_k h_k W_k - \frac{A}{c_p} \dot{q}_{rad} = 0 \quad (3)$$

$$\rho = \frac{p \bar{W}}{RT} \quad (4)$$

여기서 x는 공간좌표, \dot{M} 은 질량유량, A는 단면적, T는 온도, p는 압력, u는 혼합물의 속도, ρ는 밀도, Y_k, W_k, c_p, $\dot{\omega}_k$, h_k들은 각각 k번째 화학종의 질량분율, 분자량, 정압비열, 단위 체적당 물 생성열 및 비엔탈피를 의미한다. V_k는 k번째 화학종의 확산속도로서 열확산을 고려한 Fickian 관계를 이용하여 구해진다. 그 외에 \bar{W} 는 혼합물의 평균 분자량, R은 가스 상수, λ는 혼합물의 열전도계수, c_p는 혼합물의 정압비열, \dot{q}_{rad} 는 복사 열손실을 의미한다. 이때 복사 열손실은 Optically thin model[8]이 사용되었다.

계산에 이용된 경계조건은 식 (5)~(6)과 같이 입구에서 반응물의 특정 온도 및 조성을 부여하고, 출구에서 각 해의 구배를 0으로 처리하였다.

$$x = -\infty \text{ (미연가스 상류 측);}$$

$$T(-\infty) = T_u, \quad Y_k(-\infty) = Y_{k,u} \quad (5)$$

$$x = \infty \text{ (기연가스 하류 측);}$$

$$\frac{dT}{dx}(\infty) = 0, \quad \frac{dY_k}{dx}(\infty) = 0 \quad (6)$$

2.2. 계산방법

본 연구에서는 Premixed code[9]를 수정하여 계산을 수행하였으며, 열역학 및 전달 물성치는 각각 Chemkin II[10]와 Tranfit package[11]를 사용하였다. 상세 반응기구는 GRI-3.0[12]을 이용하였다. 이 반응기구는 CH₄의 산화반응에 대해 C₂ 반응까지 포함하며, Thermal NO, Prompt NO, N₂O-경유(Intermediate) NO 및 NO₂ 생성기구 등 NO_x의 전 반응경로를 상세하게 잘 묘사하고 있다. 계산은 메탄/air 예혼합화염을 대상으로 하였으며, 이론 당량비(1.0)에 대해 수행되었다. 또한 298 K의 입구온도와 1 atm의 압력이 고려되었다. EGR ratio와 RG ratio는 입구 혼합기 중 EGR gas와 RG가 차지하는 체적비로 표현되었으며, EGR gas는 최대 20%, RG는 최대 60%까지 고려되었다.

기준 EGR gas(이하, EGR-1)의 조성은 이론 당량비 조건에서 완전 연소된 생성물로 표현되었으며, 이들의 혼합식은 다음과 같다.



또한, EGR gas에 포함된 CO₂와 H₂O가 연소특성, 즉 화염온도, 연소속도 및 NO_x 배출에 미치는 영향을 독립적으로 검토하기 위하여 2가지의 추가적인 EGR 조성이 가정되었다. 이들의 혼합식은 다음과 같다.

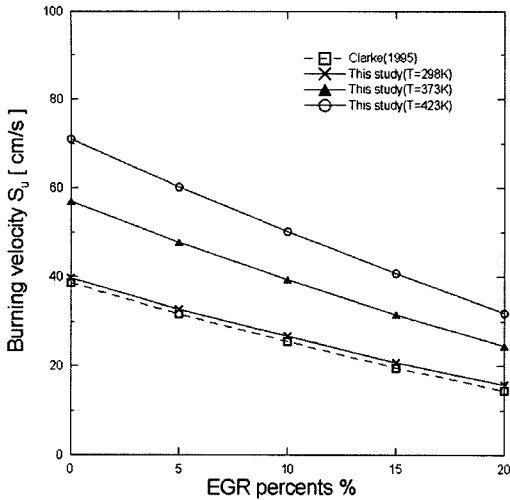


Fig. 1. Burning velocity of CH₄/air premixed flames according to EGR ratio.

$$\text{EGR-2: } 2.56\text{CO}_2 + 7.52\text{N}_2 \quad (8)$$

$$\text{EGR-3: } 3.28\text{H}_2\text{O} + 7.52\text{N}_2 \quad (9)$$

위 식에서 CO₂와 H₂O의 계수는 두 EGR 가스의 열용량이 EGR-1과 동일하도록 계산되었다.

2.3. 계산결과의 검증

Fig. 1은 EGR율에 따른 연소속도에 대한 계산결과와 Clarke 등[13]의 실험결과를 비교한 것이다. 또한 입구의 온도가 373 K과 423 K로 증가된 결과를 그림에 도시하였다. 이때 EGR 조성은 실험조건과 동일하게 15%의 CO₂와 85%의 N₂로 구성되었다. 입구 온도가 298 K일 때, 실선에 해당하는 본 계산결과와 점선에 해당하는 실험결과가 서로 잘 일치하며, EGR 율이 0%에서 20%로 증가될 때 연소속도는 약 40 cm/s에서 15 m/s로 감소됨을 알 수 있다. 또한 입구 온도의 차이에 따른 계산결과로부터 본 계산은 종류 연소속도의 온도에 대한 영향을 매우 잘 반영하고 있음을 알 수 있다. 비록 화염온도 및 NO_x 배출에 관한 추가적인 연소특성에 대한 검증결과를 논문에 제시하지는 않았으나, 본 계산이 메탄/air 예혼합 화염특성을 잘 예측하고 있음을 확인할 수 있었다.

III. 결과 및 검토

3.1. 연소특성에 EGR의 영향

Fig. 2는 3가지 조성의 EGR ratio 증가에 따른 화염온도, 연소속도 및 NO_x 배출의 저감률을 0% EGR을

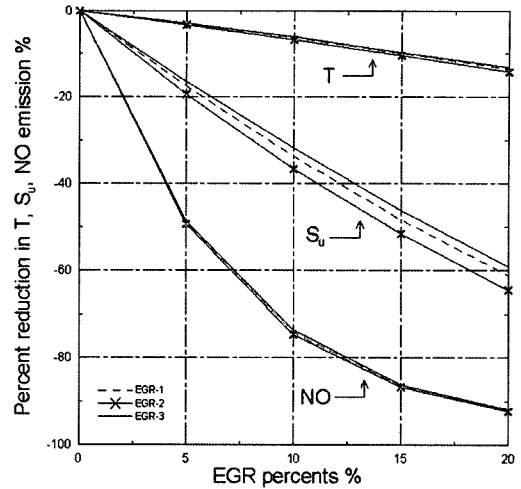


Fig. 2. Reduction rates of flame temperature, burning velocity and NO emission according to EGR ratio.

기준으로 도시한 결과이다. EGR 조성에 무관하게 EGR ratio의 증가에 따라 화염온도, 연소속도 및 NO 배출 모두 감소하는 경향을 보이고 있으며, 이 중 NO 배출이 EGR ratio에 가장 크게 영향을 받고 있음을 알 수 있다. EGR-1이 10% 첨가된 경우를 살펴보면, NO 배출은 EGR 0%에 비해 약 75% 감소되었으며, 연소속도는 34%, 화염온도는 약 6% 감소되었음을 확인할 수 있다. EGR 조성에 따른 각 연소특성의 차이를 살펴보면, 화염온도와 NO 배출량은 거의 차이를 보이지 않는 반면에 연소속도는 비교적 큰 차이를 보이고 있다. 즉 동일 EGR ratio에 대해 EGR-3 > EGR-1 > EGR-2의 순서를 보이고 있으며, 이들의 차이는 EGR ratio가 증가함에 따라 더욱 커짐을 알 수 있다. 본 연구에서 고려한 EGR 가스들은 모두 동일한 열용량을 갖도록 설정되었기 때문에, 이들은 특정 EGR ratio에 대해 거의 동일한 열적 효과(Thermal effect)를 갖게 된다. EGR이 연소특성에 주는 영향을 크게 열적효과와 화학적 효과(Chemical effect)로 구분할 때 화염온도와 NO 배출량은 주로 열적효과에 의존하는 반면 연소속도는 다른 연소특성에 비해 상대적으로 화학적 효과에 크게 영향을 받고 있음을 알 수 있다. 구체적으로 EGR에 포함된 H₂O는 CO₂에 비해 연소속도를 보다 증진시키는 화학적 효과를 갖고 있음을 그림을 통해 확인할 수 있다.

Fig. 3은 3가지 성분의 EGR이 적용된 화염구조를 나타낸 것으로서, 주요 화학종 및 CO, O, H 및 OH와 같은 중요 라디칼(Radical) 그리고 온도분포를 도시한 것이다. 이때 EGR ratio는 EGR-1의 경우에 10%가 적용

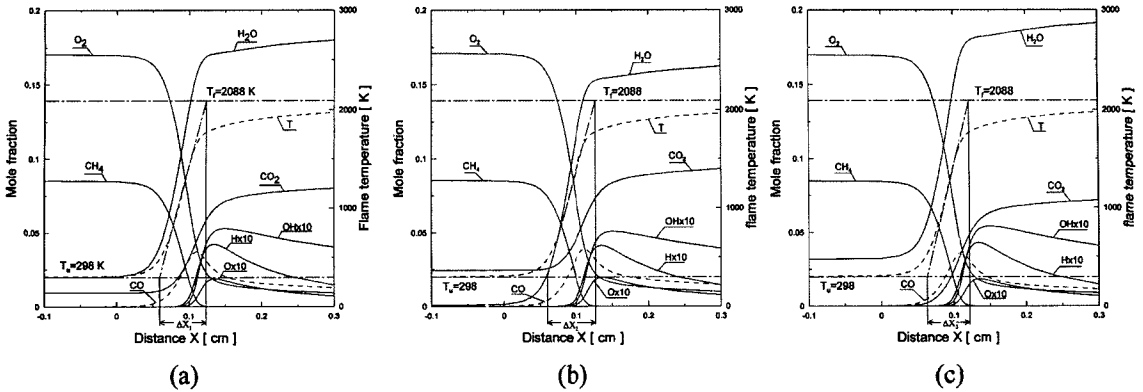


Fig. 3. The flame structure of CH₄/air/EGR_i(i=1~3) under the conditions of identical flame temperature: (a) EGR-1(10%), (b) EGR-2(9.58%) and (c) EGR-3(10.27%).

되었으며, EGR-2와 3은 각각 9.58%와 10.27%가 적용되었다. 비록 초기에 EGR의 조성이 동일 열용량을 갖도록 결정되었으나, 온도에 따른 열용량의 비선형성, 반응과정에서 생성되는 무수한 화학종들의 열 및 전달 물성치의 차이로 인하여 실제로 화염온도는 약간의 차이를 보이게 된다. 따라서 EGR 조성차이로 인한 열적 효과의 차이를 최대한 배제하기 위하여 시행착오를 통해 EGR-2와 3의 EGR ratio를 조절하여 동일한 화염온도를 갖도록 하였다. 그 결과 그림의 일점 쇄선이 의미하는 화염의 최대온도에서 확인할 수 있듯이 EGR 조성에 무관하게 화염온도는 모두 2088 K을 얻을 수 있었다. Δx 는 공간에 대한 온도구배를 통해 계산된 화염 두께를 의미한다. 그림에서 초기 EGR 성분차이로 인한 CO₂ 및 H₂O의 농도차이를 제외하고 온도분포, CH₄, O₂ 및 CO 농도는 EGR 성분에 따라 거의 차이를 보이지 않는다. 그러나 화염두께는 EGR 성분에 포함된 H₂O의 농도에 반비례하여, $\Delta x_2 > \Delta x_1 > \Delta x_3$ 의 순서를 보이고 있으며, O, H 및 OH 라디칼의 농도는 H₂O의 농도에 비례하는 경향을 보이고 있다. 즉 화염두께의 감소 및 O, H 및 OH 라디칼의 증가는 화염대에서 보다 급격한 반응이 진행됨을 의미한다. 위 결과는 Fig. 2에서 확인된 바와 같이 EGR의 성분 중 H₂O 농도로 인한 화학적 효과로 인하여 연소속도가 증가되고 있음을 직접적으로 잘 설명해주고 있으며, 연소속도에 대한 H₂O의 영향에 관한 기존 연구에서도 이와 유사한 결과들을 확인할 수 있다[14,15].

3.2. 연소특성에 대한 RG의 영향

Fig. 4는 연료/공기의 혼합기에 EGR-1이 10%와 20% 첨가되었을 때 개질 가스(RG) ratio의 증가에 따른 화염온도, 연소속도 및 NO 배출량을 순수 CH₄/air 화염

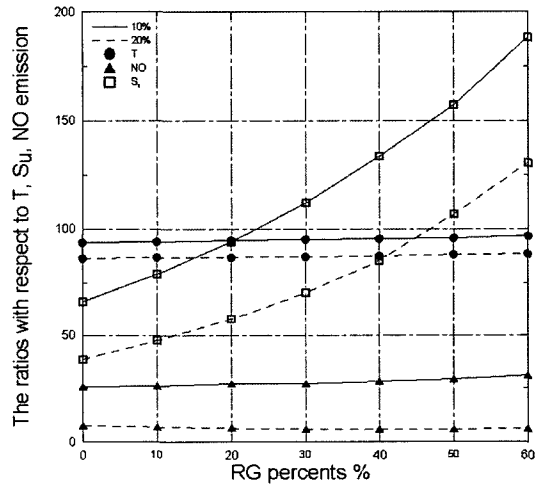


Fig. 4. Reduction rates of flame temperature, burning velocity and NO emission according to RG ratio in the conditions of EGR 10% and 20%.

의 결과에 대한 비율로 표현한 것이다. 그림에서 RG ratio는 0%에서 60%까지 변화되었다. 화염온도 및 NO 배출량은 RG ratio에 의해 거의 영향을 받지 않으며, 단지 각각의 EGR ratio에 주로 영향을 받고 있음을 수 있다. 반면에 연소속도를 살펴보면, EGR ratio 10%와 20% 모두 RG ratio 증가에 따라 크게 증가되고 있으며, EGR ratio의 차이에 의한 연소속도의 차이는 RG ratio가 증가될 때도 큰 변화를 보이지 않는다. 즉 화염온도와 NO 배출량과는 다르게 연소속도는 RG 가스에 의해 매우 큰 영향을 받고 있음을 확인할 수 있다. 위 결과로부터 EGR에 의한 NO_x 저감현상을 유지하면서, RG ratio의 조절을 통해 순수 CH₄/air 예혼합화염과 동일한 화염안정성을 갖는 조건을 예측할 수 있다. 예를

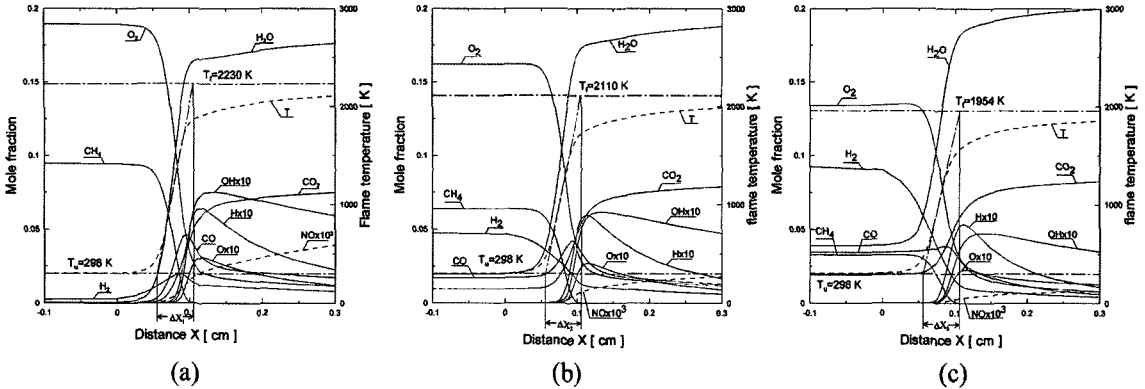


Fig. 5. The flame structure of (a) pure CH₄/air, (b) CH₄/air/EGR-1(10%/)RG(23%), (c) CH₄/air/EGR-1(20%/)RG(46%).

들어, EGR ratio 10%와 20%에 대해 RG ratio가 각각 23%와 46%일 때 연소속도가 순수 CH₄/air 화염과 동일하며, 이때 NO_x는 각각 27% 및 6%로서 매우 좋은 오염물질 배출특성을 보여주고 있다.

Fig. 5는 Fig. 4의 결과에서 동일 연소속도를 갖는 순수 CH₄/air, CH₄/air/EGR-1(10%/)RG(23%), CH₄/air/EGR-1(20%/)RG(46%)에 대해 Fig. 3과 같은 화염구조를 도시한 것이다. 화염온도는 Fig. 4에서도 확인할 수 있듯이 EGR ratio가 0%, 10%, 그리고 20%로 증가됨에 따라 2230 K, 2110 K 그리고 1954 K으로 감소된다. 그러나 화염두께 Δ_x는 모든 조건에 대해 약 0.48 mm이며, Fig. 5(b)와 (c)에서 확인할 수 있듯이, EGR ratio가 증가되더라도 RG ratio가 증가함에 따라 O, H 및 OH 라디칼이 순수 CH₄/air 화염에서의 농도와 거의 유사함을 확인할 수 있다.

본 연구에서는 RG의 첨가가 연소속도에 미치는 영향을 보다 구체적으로 검토하기 위하여, 연소속도에 대한 민감도 해석을 수행하였다. Fig. 6은 CH₄/air/EGR-1(10%)와 CH₄/air/EGR-1(20%)의 혼합기에 RG ratio를 0%에서 20%로 증가시켰을 때 연소속도 변화에 가장 민감한 소반응들의 무차원 민감도 계수를 각각 도시한 것이다. 이때 무차원 민감도 계수는 다음과 같은 식에 의해 계산된다.

$$SF_i = \frac{A_i \partial S_u}{S_u \partial A_i} \quad (10)$$

여기서, SF_i는 각 소반응의 민감도 계수를 의미하며, A_i는 ith 반응상수의 pre-exponential factor, S_u는 연소속도를 의미한다. 양수의 민감도 계수는 그 소반응이 연소속도의 증가에 기여함을 의미하며, 음수는 연소속도의 감소에 기여함을 나타낸다. 또한 무차원된 민감도 계수

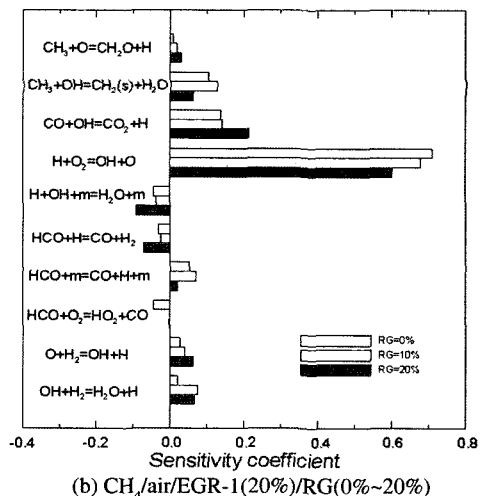
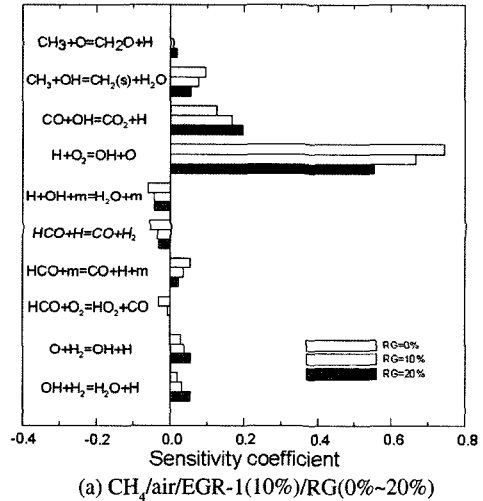
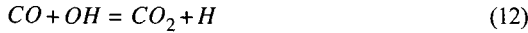


Fig. 6. The normalized sensitivity coefficients of the reactions related to the burning velocity.

의 크기는 연소속도 변화에 대한 상대적인 기여도를 의미한다.

Fig. 6의 두 조건에서 공통적으로 연소속도의 증가에 가장 크게 기여하는 반응을 살펴보면, 다음과 같은 두 반응을 확인할 수 있다.



위 결과로부터 RG의 첨가는 화염대에서 H, OH 및 O 라디칼의 생성을 촉진시켜 연소속도의 증가에 크게 기여하게 됨을 예측할 수 있다.

IV. 결 론

본 연구에서는 CH₄/air 예혼합화염을 대상으로 EGR 성능개선을 위한 개질 가스의 첨가로 인한 연소특성 변화를 검토하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

(1) 동일한 열적 효과를 갖는 EGR의 조성변화를 통해 EGR 성분에 포함된 H₂O 농도의 증가는 화학적 효과로 인하여 화염대에서 O, H 및 OH 등의 라디칼의 증가 및 화염두께를 감소시키며, 결과적으로 연소속도의 증가에 기여함을 확인하였다.

(2) RG의 첨가는 화염온도 및 NO_x에 큰 영향을 주지 않으며, 연소속도의 증가에 크게 영향을 주기 때문에, EGR을 이용한 저 NO_x 상태를 유지하면서, RG ratio의 조절을 통해 순수 CH₄/air 예혼합화염과 동일한 화염안정성을 얻을 수 있음을 확인하였다.

(3) RG 첨가로 인한 연소속도의 증가 원인으로서 화염대에서 O, H 및 OH 라디칼의 생성량 증가 때문임을 상세한 반응기구의 민감도 해석을 통해 확인할 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 2006년도 인하공업전문대학 산업기술연구소 학술연구과제의 지원에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

[1] Zheng, M., G.T. Reader, and J.G. Hawley, "Diesel Engine Exhaust Gas Recirculation -A Review on Advanced and Novel Concepts", *Energy Conversion and Management*, **45**(6), 883-900, (2004)

[2] Abd-Alla, G.H., "Using Exhaust Gas Recirculation in Internal Combustion Engines: A Review", *Energy Conversion and Management*, **43**(8), 1027-1042, (2002)

[3] Lefebvre, A.H., "The Role of Fuel Preparation in Low Emission Combustion", *ASME J. Eng. Gas Turbines Power*, **117**, 617-654, (1995)

[4] Selim, M.Y.E., "Effect of Exhaust Gas Recirculation on Some Combustion Characteristics of Dual Fuel Engine", *Energy Conversion and Management*, **44**(5), 709-723, (2003)

[5] Coppens, F.H.V., J. De Ruyck, and A.A. Konnov, "Effects of Hydrogen Enrichment on Adiabatic Burning Velocity and NO Formation in Methane + Air Flame", *Experimental Thermal and Fluid Science*, **31**, 437-444, (2007)

[6] Han, P., M.D. Checkel, and B.A. Fleck, "Hydrogen from Reformer Gas a Novel Fuel and Bridging Technology: A Combustion Perspective", *Int. J. Hydrogen Energy*, **32**, 1416-1420, (2007)

[7] Han, P., M.D. Checkel, B.A. Fleck, and N.L. Nowicki, "Burning Velocity of Methane/Diluent Mixture with Reformer Gas Addition", *Fuel*, **86**, 585-596, (2007)

[8] Tien, C.L., "Thermal Radiation Properties of Gases", *Advances in Heat Transfer*, **5**, 253-232, (1968)

[9] Kee, R.J., J.F. Grcar, M.D. Smooke, and J.A. Miller, "A Fortran Program for Modeling Steady Laminar One-dimensional Premixed Flame", SAND 85-8240, (1994)

[10] Kee, R.J., F.M. Rupley, and J.A. Miller, "Chemkin-II: A Fortran Chemical Kinetics Package for the Analysis of Gas Phase Chemical Kinetics", SAND89-8009B, (1994)

[11] Kee, R.J., G.J. Dixon-Lewis Warnatz, M.E. Coltrin, and J.A. Miller, "A Fortran Computer Code Package for the Evaluation of Gas-phase Multi-component Transport", SAND86-8246, (1994)

[12] GRI Mech. Ver. 3.0, web address: http://www.me.berkeley.edu/gri_mech/

[13] Clarke, A., R. Stone, and P. Beckwith, "The Measurement of Laminar Burning Velocity of Methane/Air/Diluent Mixtures in a Constant Volume Combustion Bomb in a Micro-Gravity Environment", *J. Inst. Energy*, **68**, 130-136, (1995)

[14] Rørtveit, G.J., Johan E. Hustad, S.C. Li, and F.A. Williams, "Effects of Diluents on NO_x Formation in Hydrogen Counterflow Flames", *Combustion and*

다양한 연료의 EGR 성능개선에 관한 기초연구(Part I: 메탄/air 예혼합화염에서 RG의 첨가효과)

Flame, **130**, 48-61, (2002)

[15] Sung, C.J. and Y. Huang, "Effects of Reformer Gas Addition on the Laminar Flame Speeds and

Flammability Limits of N-butane and Isobutane Flames", *Combustion and Flame*, **126**, 1699-1713, (2001)