

# EGR 및 예혼합 정도가 메탄/공기 화염의 NO 생성에 미치는 영향

이 원 남\* · 이 응 재\*\*

## Effects of EGR and Premixedness on NO Formation of Methane/Air Flames

Won-Nam Lee and Woong-Jae Lee

**Key Words:** NO<sub>x</sub>(질소산화물), Methane/Air Flame(메탄/공기 화염), EGR(배기 가스 재순환), Premixedness(예혼합정도)

### Abstract

The effects of EGR and premixedness on NO formation have been numerically investigated. The flame structure is classified into three categories; premixed flame( $\alpha = 1$ ), rich/lean premixed flame( $\alpha = 0.6$  and  $0.8$ ) and diffusion flame( $\alpha = 0$ ). NO formation/destruction mechanisms are assorted to thermal, reburn and Fenimore mechanisms. The temperature of unburned gas is arranged to 298 and 500 K to have access to the condition in a real internal combustion engine. The results show that all three NO formation/destruction reaction rates in the fuel rich flame zone could be decreased by EGR for rich/lean premixed flames, while those in the fuel lean flame zone are not significantly changed. Near the stagnation plane, however, only the thermal NO reaction rate is decreased. The contribution of reburn and Fenimore mechanisms for the net NO production becomes less significant as the premixedness of a flame increases. The larger amount of NO reduction with EGR is expected under the higher temperature and/or higher fuel/air premixedness conditions due to the increased contribution of the thermal mechanism. The role of Fenimore and reburn mechanisms could be important for rich premixed and diffusion flames; therefore, the effect of EGR on NO reduction could vary with fuel/air premixedness. The premixedness of a partially premixed flame changes the flame structure and could affect the NO production characteristics.

### 기호설명

\* 단국대학교 기계공학과  
\*\* 단국대학교 대학원

$c_{pi}$  :  $i$ -화학종의 정압비열, cal/mol · K  
 $h_i$  :  $i$ -화학종의 엔탈피, cal/mol  
N : 화학종의 수

R : 일반 기체상수,  $8.314\text{kJ}/(\text{K} \cdot \text{mol})$   
 T : 온도, K  
 $\rho$  : 밀도,  $\text{g}/\text{cm}^3$   
 $W_i$  :  $i$ -화학종의 분자량, g/mol  
 $\omega_i$  :  $i$ -화학종의 반응율,  $\text{mol}/(\text{cm}^3 \cdot \text{s})$   
 $Y_i$  :  $i$ -화학종의 질량분율

## 1. 서 론

질소산화물( $\text{NO}_x$ )은 대부분이 연소 과정에서 발생하는 NO로부터 기인되며, 특히 도시 지역  $\text{NO}_x$ 의 대부분은 차량으로부터 배출되고 있다. 이에 따라 차량의 배기가스에 대한 규제가 계속하여 강화되고 있어 내연기관에서 생성 및 배출되는  $\text{NO}_x$ 의 제어가 절실히 요구되고 있다. 최근에는 가솔린 직접분사(GDI) 방식과 같은 새로운 연소기술의 도입과 압축천연가스(CNG)를 연료로 사용하는 엔진의 개발 등 차량의 배기가스 저감 기술이 활발히 연구되고 있다. GDI 연소 방식은 배기가스의 저감뿐만 아니라 연소 효율의 향상 등 많은 장점을 갖는 것으로 알려져 있다.<sup>(1)</sup> 이와 같은 GDI 엔진은 지금까지의 가솔린엔진의 예혼합 연소와 구별하여 부분 예혼합 연소의 개념을 도입하고 있다. 따라서 GDI 엔진의 대기오염 물질 배출 특성을 이해하기 위해서는 부분 예혼합 연소과정에서 발생하는 대기오염 물질의 생성에 대한 지식이 필요하게 된다.

천연가스는 자연상태에서 매장량이 풍부하고 연료로서의 가격 경쟁력이 있으며 연소과정에서 유해한 배기가스가 비교적 적게 배출되어 청정연소가 가능하다는 장점이 있다. 따라서 천연가스는 다양한 연소 기기의 연료로서 사용되고 있으며, 최근에는 천연가스를 이용한 내연기관의 개발 및 실용화가 이루어지고 있다. 천연가스의 대부분을 차지하고 있

는 메탄은 가장 간단한 파라핀 계열의 탄화수소 연료로서 NO 생성 반응을 포함한 연소 반응 메커니즘이 비교적 많이 알려져 있다.<sup>(2-8)</sup> 메탄은 구조적 특성상 연소과정에서 발생하는 CO, HC 및 매연 입자 등 대기오염 물질의 배출이 다른 연료에 비하여 비교적 적지만,  $\text{NO}_x$ 의 발생은 거의 유사하다고 알려져 있다. 또한 배기 가스 재순환(EGR)은 내연기관의  $\text{NO}_x$ 를 제어하는 방법으로 잘 알려져 있다.

최근 당량비의 변화에 따른 NO 생성 특성에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. Feese and Turns<sup>(5)</sup>는 증류 확산 화염에서 FGR(Flue Gas Recirculation)과  $\text{N}_2$ 를 희석시킴으로써 증류 확산 화염에서 산화제 쪽에 희석제를 첨가시키는 것이 연료 쪽에 첨가시키는 것보다 NO 저감 효과가 더 뛰어나다는 것을 보여주었고, Blevins and Gore<sup>(7)</sup>는 낮은 스트레인을에서 예혼합된 연료의 당량비를 변화시켜 (1.6, 1.8, 2.0) NO 생성/소멸 메커니즘을 설명하였다. 이에 따르면 당량비는 NO의 생성/소멸에 중요한 역할을 하며, 순수 확산 화염에서는 NO 소멸 반응이 중요하다고 하였다. Li and Williams<sup>(8)</sup>는 대항류 버너에서 산화제 쪽에  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2$ 를 첨가시켜 NO 생성에 미치는 영향을 알아보았으며, 당량비에 따라 thermal 및 화학적인 영향으로  $\text{H}_2\text{O}$ 를 첨가시키는 것이 NO 억제에 더 효과적이라고 하였다.

본 연구에서는 메탄/공기 화염을 대상으로 부분 예혼합 연소과정에서 생성되는 NO에 대한 연구를 수치해석적으로 수행하였다. 특히 예혼합정도와 배기 가스 재순환(EGR)에 따른 NO 생성 특성의 변화와 thermal, Fenimore 및 NO 재연소(reburn) 메커니즘의 역할을 알아보았다.

과농 예혼합 화염과 희박 예혼합 화염을 동시에 형성하고 EGR을 첨가시킴으로써 (5%, 10%, 15%) 부분 예혼합 연소상태에서 EGR이 NO 생성/소멸에 미치는 영향을 알아보았다. 또한 실제 내연기관의 조건에 접근하기 위해 미연 가스의 온도를 500 K로 가열하고 EGR 첨가가 NO 생성에 어떠한 영향을 미치는 가를 알아보았다.

### 2. 지배 방정식 및 경계조건

대향류 예혼합 화염의 구조는 Fig. 1에 나타냈다. 이 화염구조는 예혼합 화염에서 일어나는 자세한 과정을 모델링하는데 편리한 기하학적 구조를 가지고 있다. 과농의 연료·산화제와 희박의 연료·산화제가 서로 반대로 마주하여 정체 유동(stagnation flow)에서 정체점을 중심으로 양쪽에 화염이 생성된다. 유선(streamline)을 따라 흐르는 유동의 수학적 해석은 1차원적 해석이 가능하게 한다. 즉, 화학종의 질량분율, 온도, 속도 등이 단지  $z$ 만의 함수이기 때문에 그 결과 폭넓은 화학 반응 메커니즘을 수치 해석적으로 화염의 모델링에 적용할 수 있다.

원통 좌표계에서 좌표축의 축방향을  $z$ , 반경방향을  $r$ 로 하여 대향류 유동장의 지배방정식을 표현하면 다음과 같다.<sup>(9,10)</sup>

연속 방정식과 운동량 방정식은

$$\frac{dU}{dz} + 2af' = 0 \tag{1}$$

$$\frac{d}{dz} \left( \mu \frac{df'}{dz} \right) - U \frac{df'}{dz} + a[\rho_\infty - \rho(f')^2] = 0 \tag{2}$$

화학종 방정식, 에너지 방정식과 상태방정식은

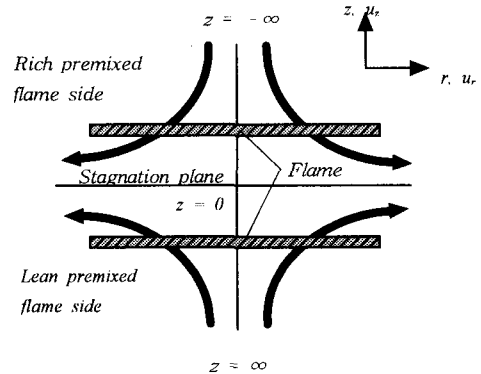


Fig. 1 Structure of a counterflow double premixed flame.

$$\frac{d}{dz} (\rho Y_i U_{iz}) + U \frac{dY_i}{dz} - w_i W_i = 0 \tag{3}$$

$$\frac{d}{dz} \left( \lambda \frac{dT}{dz} \right) - \bar{c}_p U \frac{dT}{dz} - \sum_{i=1}^N \rho Y_i U_{iz} c_{p,i} \frac{dT}{dz} - \sum_{i=1}^N w_i W_i h_i = 0 \tag{4}$$

$$p = \frac{\rho RT}{W} \tag{5}$$

로 나타낼 수 있다.

여기에서 축방향의 질량 유량, 유선함수  $f$  와 유동의 반경 방향 속도의 반경 방향 변화율을 나타내는 스트레인율(strain rate)  $a$  를 각각 다음과 같이 정의한다.

$$U(z) \equiv \rho u_z \tag{6}$$

$$f' \equiv -\frac{1}{2\rho} \left( \frac{\rho_\infty}{\Lambda} \right)^{\frac{1}{2}} \frac{dU}{dz} \tag{7}$$

$$a = (\Lambda / \rho_\infty)^{\frac{1}{2}} \tag{8}$$

지배방정식의 경계조건은 다음과 같다.

$$z \rightarrow -\infty;$$

$$f' = \sqrt{\frac{\rho_\infty}{\rho_{-\infty}}} \tag{9}$$

$$Y_k = Y_{k-\infty}, \quad k = 1, 2, \dots, N$$

$$T = T_{-\infty}$$

$$\begin{aligned}
 z &\rightarrow \infty; \\
 f' &= 1 \\
 Y_k &= Y_{k\infty}, \quad k = 1, 2, \dots, N \\
 T &= T_\infty
 \end{aligned}
 \tag{10}$$

화학 반응식과 열역학적 물성치의 계산은 CHEMKIN-II을 이용하고, 전달 물성치는 TRANSPORT PACKAGE로 계산하였다. 본 연구에서 사용한 화학 반응 메카니즘은 49개의 화학종과 279개의 화학반응식으로 이루어진 GRI-Mech 2.11을 이용하였다.<sup>(11,12)</sup> 노즐 간격은 1 cm로 하고 노즐 출구 속도는 양쪽 모두 80 cm/s로 하였다.

### 3. NO 생성/소멸 메카니즘

연소 과정에서 생성되는 NO 생성 메카니즘은 크게 세 가지로 구분될 수 있다. 먼저 고온에서 생성되는 thermal (또는 Zeldovich) 메카니즘이다. 그리고 화염 지역에서 생성되는 Fenimore (또는 prompt) 메카니즘과 희박 화염과 저온 조건에서 중요시되는 N<sub>2</sub>O-intermediate 메카니즘이다. 또한 NO는 연소과정에서 생성뿐만 아니라 소멸되는 메카니즘이 있는데 이를 재연소(reburn) 메카니즘이라 한다.<sup>(7)</sup> 이는 연료 과농 조건에서 CH<sub>i</sub> (i = 0, 1, 2, 3) 라디칼들에 의해서 NO가 N<sub>2</sub>로 환원되게 된다. 본 논문에서는 NO 생성/소멸 메카니즘을 thermal 메카니즘, reburn 메카니즘, 그 밖의 NO 생성/소멸 메카니즘을 모두 포함한 Fenimore 메카니즘 세 가지로 분류하여 NO 생성/소멸에 미치는 메카니즘에 관해 연구하였다. 본 논문에서 사용한 반응 메카니즘(GRI-Mech 2.11)은 279개의 반응식으로 이루어져 있고 이 중에 NO와 관련된 반응식

은 모두 38개이다. 본 연구에서는 38개의 화학 반응식 중에서 178번부터 180번까지의 화학 반응식을 thermal 메카니즘으로, 244번부터 256번까지의 반응식을 reburn 메카니즘으로, 나머지 22개의 반응식을 Fenimore 메카니즘으로 사용하였다(182, 199, 228, 186-189, 190, 195, 198, 208, 212-216, 222, 224, 226, 229, 258, 274).

### 4. 결과 및 고찰

#### 4.1 예혼합 정도에 따른 NO 분포

본 논문에서 분석하는 화염구조는 확산 화염(diffusion flame), 예혼합 화염(premixed flame)과 과농/희박 예혼합 화염으로 나눌 수 있다. 예혼합정도( $\alpha$ )에 따른 화염구조를 고려하기 위해 한 출구에서의 메탄과 공기의 당량비를  $\alpha$ 로 할 때, 다른 한쪽의 당량비를  $1/\alpha$ 로 조절하였다. 즉, 확산 화염의 경우  $\alpha=0$ , 예혼합 화염의 경우  $\alpha=1$ , 과농/희박 예혼합 화염의 경우  $\alpha=0.6, 0.8$ 로 하여 예혼합 정도에 따른 NO 생성/소멸 메카니즘의 변화를 알아보았다.

Fig. 2는 화염 구조의 변화가 NO생성 특성에 미치는 영향을 나타내고 있다. 단일 화염구조를 갖는 확산화염( $\alpha=0$ )은 한 쪽에서 공기만, 다른 한쪽에서는 연료만 나와서 화염을 형성하고, 예혼합 화염( $\alpha=1$ )은 연료와 공기가 양쪽에서 이룬 혼합비로 섞여 있으므로 대칭구조를 갖게 된다. 본 연구에서 사용된 조건(노즐 간격 1 cm, 출구속도 80 cm/s)에서 과농/희박 예혼합 화염( $\alpha=0.6, 0.8$ )은 이중화염(double flame)과 삼중화염(triple flame)구조로 되어 있음을 알 수 있다. 삼중 화염( $\alpha=0.8$ )은 과농한 화염과 희박한 화염 사이에 이 두 화염의 상호 작용에

의해 나타나는 확산 화염이 존재하는데 여기서의 확산 화염은 과농 예혼합 화염에서 공급된  $H_2$ 와 CO가 희박 예혼합 화염에서 공급된 산소와 반응하는 화염이다.<sup>(13)</sup> 이중화염( $\alpha=0.6$ )은 분리된 희박 화염 지역과 과농화염과 확산 화염이 함께 존재하는 지역을 갖는 2중구조로 되어 있다. 예혼합 화염( $\alpha=1$ )의 NO 분포는 중앙의 정체점에서 농도가 가장 높고 대칭이며 넓은 지역에 존재하는 반면, 과농/희박 예혼합 화염( $\alpha=0.6, 0.8$ )은 당량비의 차이와 화염의 구조적 특성으로 NO 분포가 비대칭으로 나타난다. 확산 화염( $\alpha=0$ )의 NO는 매우 좁은 지역에 분포하며 특히 연료 쪽으로 치우쳐지는 경향이 있으며 이는 reburn 메카니즘의 역할과 관계가 있다고 알려져 있다.<sup>(7)</sup>

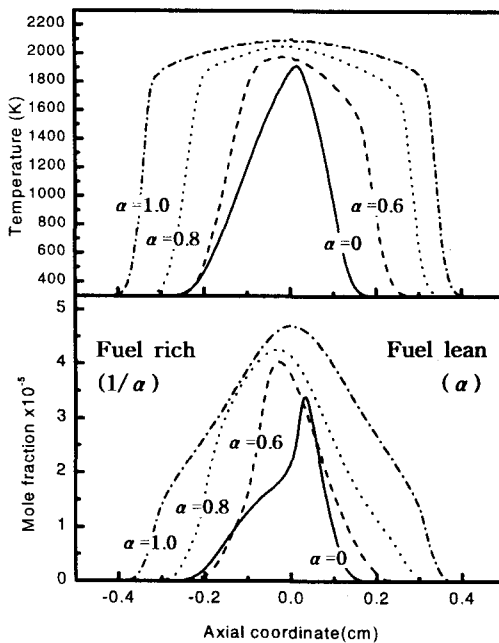


Fig. 2 Temperature and NO concentration profiles ( $\alpha=0, 0.6, 0.8, 1.0$ ).

Fig. 3은 각각의 화염에서 NO 생성 메카니즘의 역할의 중요성을 보여주고 있다. 여기에서 thermal, Fenimore( $N_2O$  메카니즘 등을 포함), reburn 반응을 각각 고려하여 NO 반응율을 계산하였다.

예혼합 화염( $\alpha=1$ )의 경우 Fenimore 및 reburn 메카니즘의 기여도가 비교적 적으며 정체면을 중심으로 고온지역이 넓어 thermal 메카니즘의 역할이 매우 크다는 것을 알 수 있다. 반면에 확산화염( $\alpha=0$ )은 반응지역이 매우 좁으며 thermal, Fenimore 및 reburn 반응에 의한 NO 생성/소멸율이 매우 높게된다. 비대칭 화염인  $\alpha=0.6$ 의 경우 NO 생성/소멸율이 과농 예혼합 지역에서만 높고 희박 예혼합 지역에서는 매우 낮으며, 특히 희박 예혼합 지역에서는 reburn의 역할이 거의 없음을 알 수 있다.  $\alpha$ 가 0.8로 증가하면 희박 예혼합 지역에서도 Fenimore( $N_2O$  메카니즘 등을 포함) 메카니즘에 의한 NO 생성이 중요하게 되며,  $\alpha=0.6$  또는 0.8의 이중, 삼중 화염에서는 과농/희박 예혼합 화염의 위치에 따라 thermal, Fenimore 및 reburn 메카니즘의 상대적인 기여도가 다를 수 있음을 알 수 있다.

#### 4.2 EGR에 따른 NO 생성/소멸 메카니즘

Fig. 4는 EGR 희석에 따른 NO 생성율 (net NO production rate)의 변화를 예혼합 정도( $\alpha=0.6, 0.8, 1.0$ )에 따라 보여주고 있다.

대향류 화염의 특성상 EGR로 희석시키면 화염영역이 정체점 쪽으로 좁아지며 따라서 NO 생성 지역도 줄어들게 된다. 예혼합화염( $\alpha=1$ ) 및 과농 예혼합화염 지역( $\alpha=0.6, 0.8$ 의 경우)에서는 NO 생성율이 EGR에 의해 크게 낮아지는 반면에 희박 예혼합화염 지역( $\alpha=0.8$ ) 및

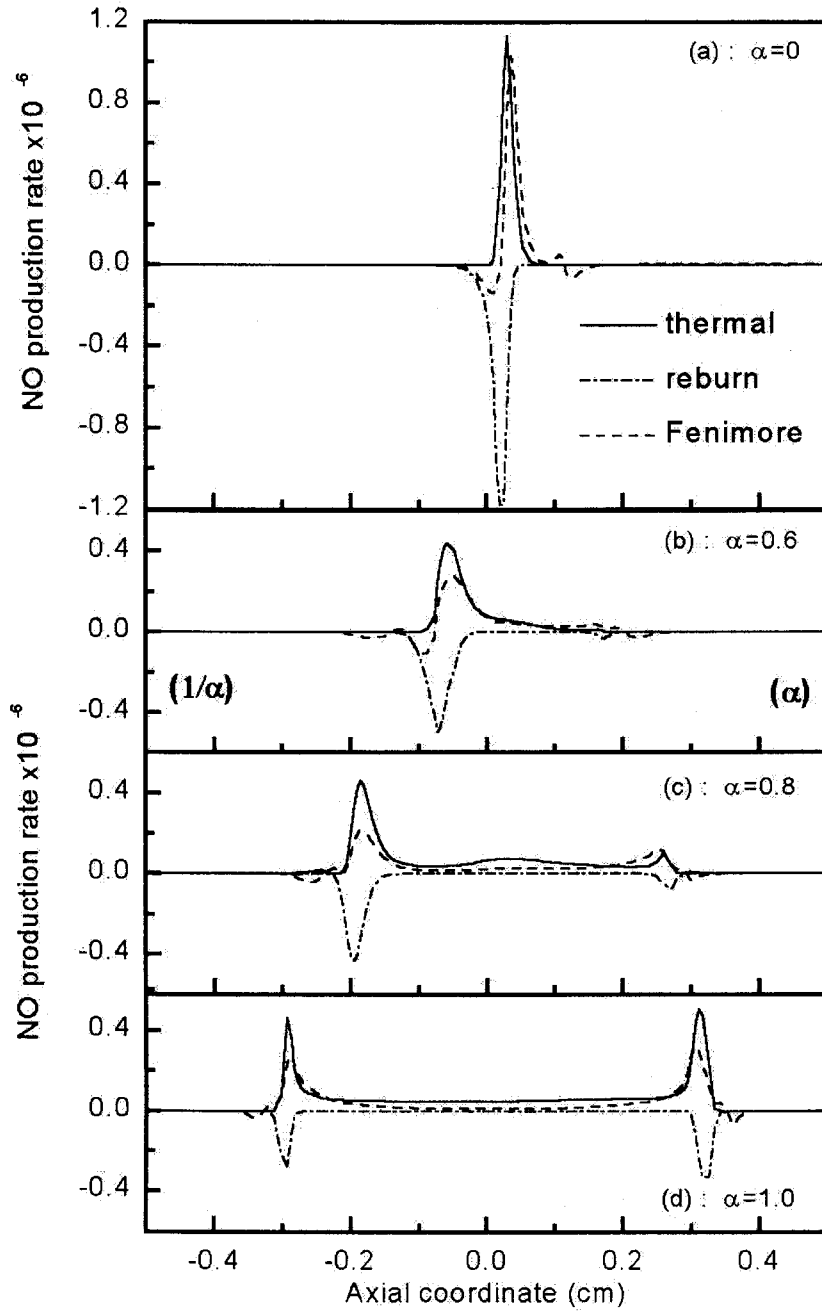


Fig. 3 NO production rate via thermal, reburn and Fenimore mechanisms without EGR dilution ( $\alpha=0, 0.6, 0.8, 1.0$ ).

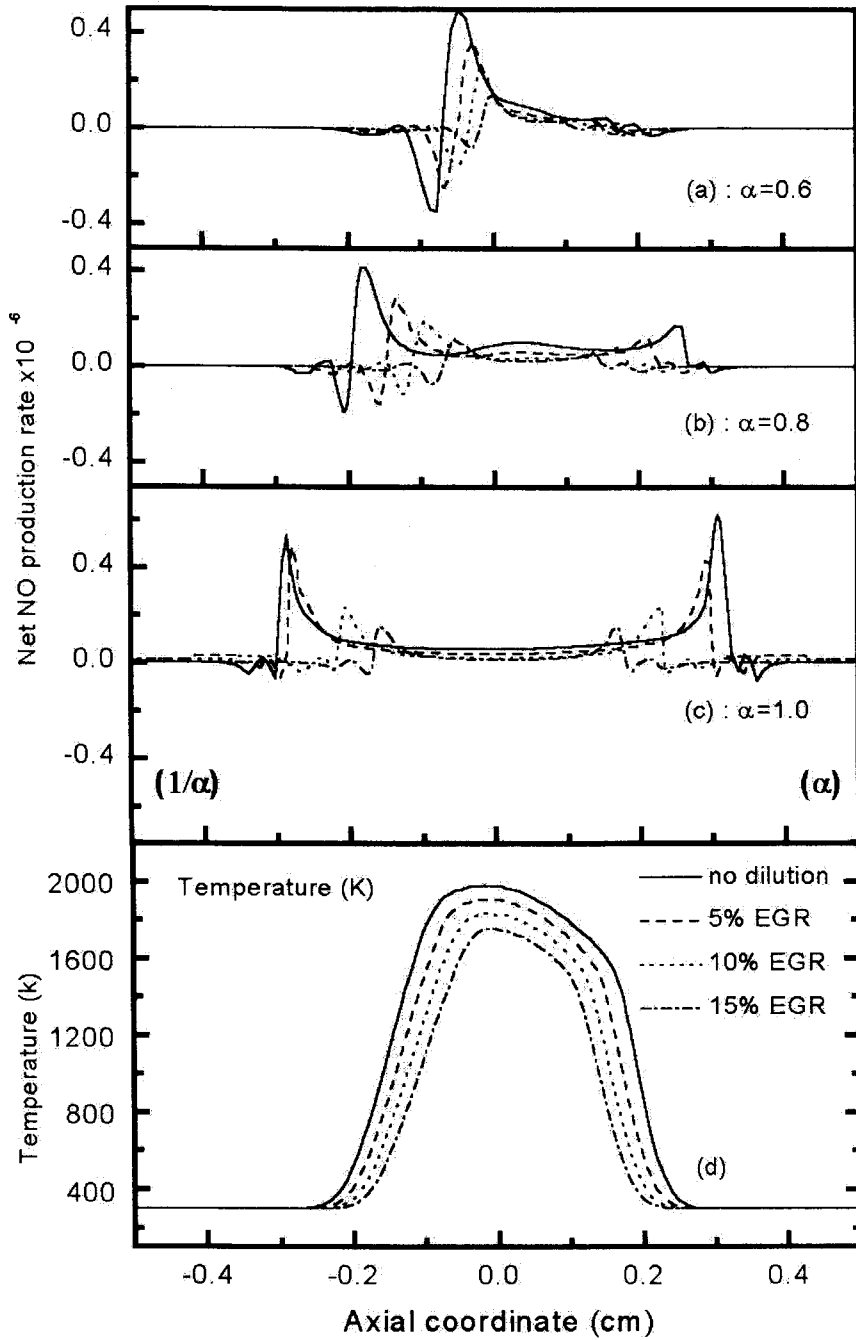


Fig. 4 Net NO production rates and temperature profiles with EGR dilution ( $\alpha = 0.6, 0.8, 1.0$ ).

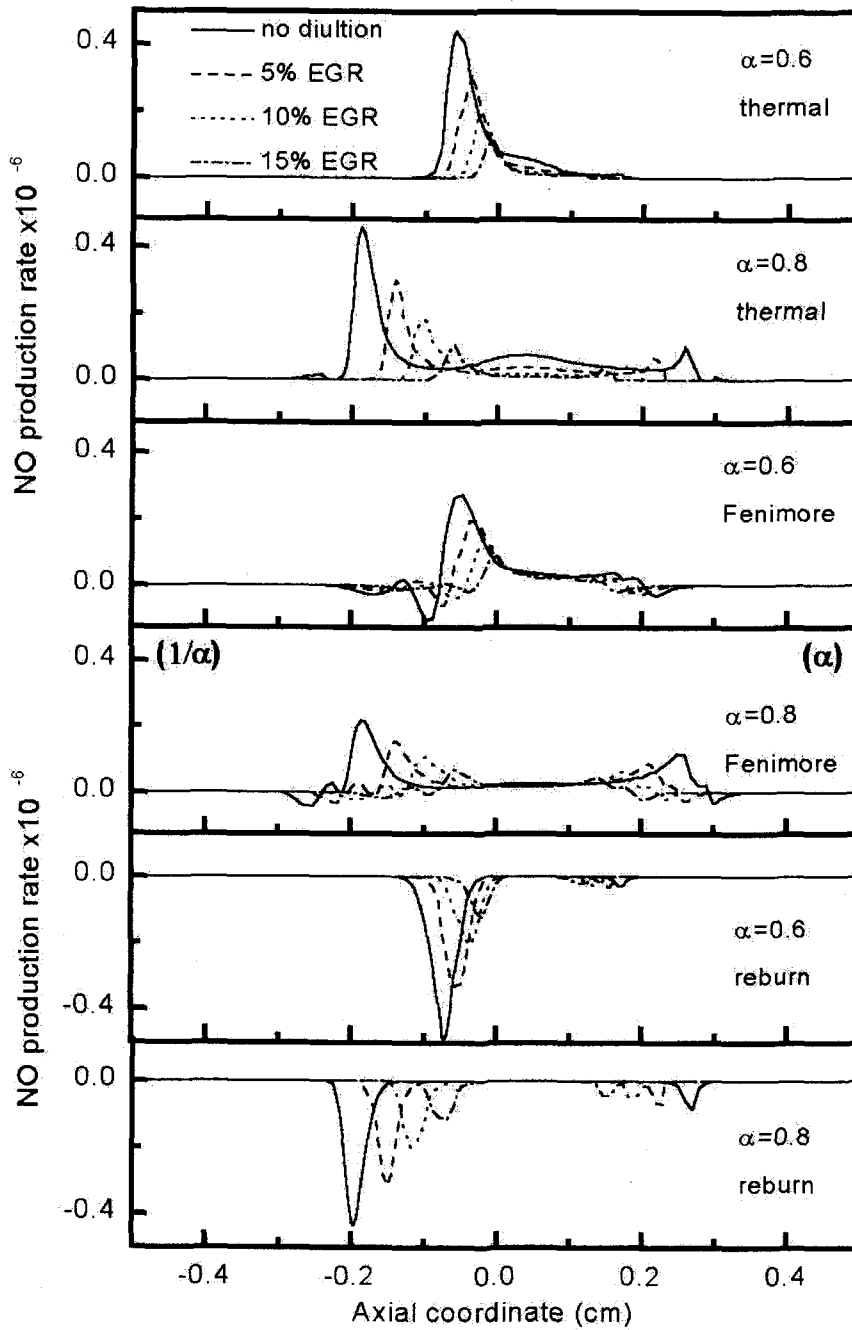


Fig. 5 NO production rate via thermal, reburn and Fenimore mechanisms with EGR dilution.



과농/희박 연소 지역이 교차되는 정체점 부근에서는 비교적 EGR의 영향이 적게 나타났다. 따라서 과농 연소 지역과 이 혼합비 연소 지역에서 EGR의 효과가 희박 연소 지역에 비해 크다는 것을 알 수 있다. 이는 Fig. 4(d)에 나타난 EGR에 따른 온도 분포( $\alpha=0.6$ )와 같이, 과농 화염 지역의 화염 온도가 희박 화염 지역에 비해 높고 따라서 EGR 희석에 따라 thermal 메카니즘의 반응율이 낮아지기 때문이라고 생각된다.

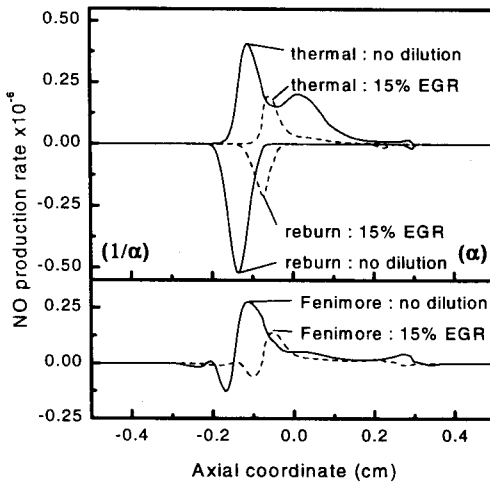


Fig. 6 NO production rate via thermal, reburn and Fenimore mechanisms with and without EGR dilution for initial temperature 500 K ( $\alpha=0.6$ ).

각각의 NO 생성/소멸 메카니즘 (thermal, Fenimore, reburn)에 대한 EGR의 영향을 알아보기 위해  $\alpha=0.6, 0.8$ 일 때 EGR 희석시 NO 생성/소멸율의 변화를 Fig. 5에 나타냈다. 과농 화염면 근처에서는 세 가지 반응 메카니즘 모두 EGR의 의한 감소 효과가 나타나지만 예혼합 화염면을 지난 중간 지역에서는 thermal 반응 메카니즘만이 변화가 있음을 알 수

있다. 또한 과농/희박 연소 지역의 중간 지점인 정체점 부근에서는 thermal NO의 생성율이 감소되지만 Fenimore NO의 생성율은 변화가 없었다. 이 지역에서는  $CH_4$  및  $C_2$  라디칼이 거의 존재하지 않으며 reburn에 의한 NO의 소멸반응은 없는 것으로 나타났다.

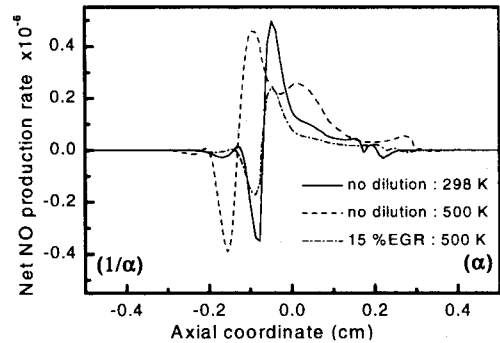


Fig. 7 Net NO production rate with and without EGR dilution for initial temperature 500 K and 298 K ( $\alpha=0.6$ ).

Fig. 6은  $\alpha=0.6$ 일 때 연료/공기 혼합기의 초기 온도를 500 K로 증가시키고 여기에 EGR 15%를 적용한 경우의 NO 생성 특성을 보여준다. 초기 온도가 500 K로 증가된 경우 연소반응 속도의 증가에 따라 화염의 구조가 이중 화염에서 삼중 화염과 유사하게 변화하였다. 이와 같은 화염 구조의 변화는 반응지역을 확대시키며, 이에 따라 thermal NO 메카니즘의 역할이 증가하고 NO의 생성이 증가하게 된다. EGR 희석(15%)은 연소반응 속도를 감소시키고 화염의 구조를 이중화염의 형태로 변화시키며, 연소 온도의 감소와 고온지역의 축소로 NO 생성이 줄어들고 상대적으로 Fenimore 및 reburn의 역할이 증가하게 된다. 이때의 NO 생성율의 분포는 Fig. 7에 나타난 것

과 같이 EGR이 없는 초기 온도 298 K의 경우와 절대값의 차이는 있지만 공간적 분포가 유사한 형태를 보이는 것을 알 수 있다. 그러므로 화염의 구조와 예혼합 정도가 부분 예혼합 화염에서의 NO 생성 특성에 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있다.

### 4.3 EGR에 따른 NO 생성/소멸

#### 메카니즘의 기여도

화염에서의 NO 생성 특성은 NO 배출지수로 나타낼 수 있다. 이때 NO 배출지수는 화염영역에서 적분된 전체 연료의 소모율에 대한 NO 생성율의 비로 나타내게 된다.<sup>(3)</sup>

$$EI_{NO} = \frac{\int_{-L}^L W_{NO} \cdot \bar{w}_{NO} dx}{-\int_{-L}^L W_{CH_4} \cdot \bar{w}_{CH_4} dx} \quad (11)$$

여기에서  $W_{NO}$ ,  $W_{CH_4}$ 는 NO 분자량과  $CH_4$ 의 분자량을 나타내며,  $\bar{w}_{CH_4}$ ,  $\bar{w}_{NO}$ 는 각각 메탄의 소모율과 NO의 생성율을 나타낸다.

NO 생성/소멸 메카니즘의 기여도를 알아보기 위해 본 논문에서는 다음과 같이 정의하였다.

$$re/th = (EI - reburn)/(EI - thermal) \quad (12)$$

$$fe/th = (EI - Fenimore)/(EI - thermal) \quad (13)$$

$$re/fe = (EI - reburn)/(EI - Fenimore) \quad (14)$$

여기에서 *EI-reburn*은 reburn 화학 반응식들만을 고려하여 NO 배출 지수를 구

한 값이며, *EI-thermal*과 *EI-Fenimore*도 같은 방법으로 각각의 반응식들만을 고려하여 구하였으며 각각의 메카니즘에 포함되는 반응식은 앞에서 언급한 NO 생성/소멸 메카니즘과 동일하다.

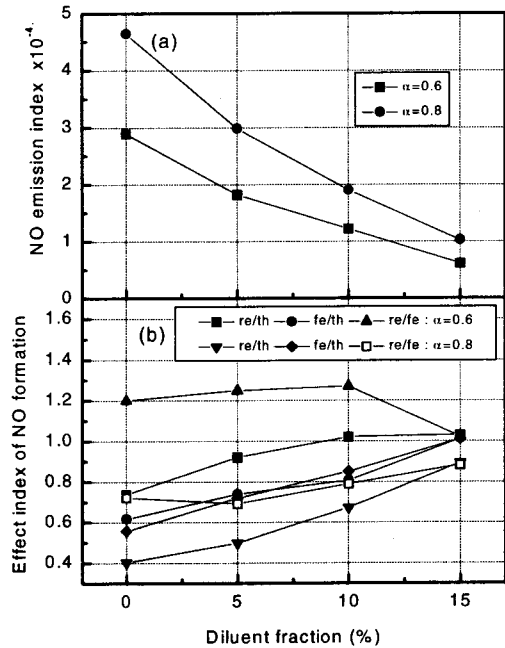


Fig 8. NO emission indices and effect indices of NO formation as  $\alpha=0.6$  and 0.8.

Fig. 8은  $\alpha=0.6$ , 0.8 조건에서 EGR에 따른 배출지수(a)와 기여도(b)를 보여주고 있다. EGR 희석시 NO의 양은 감소하고  $\alpha=0.6$ 일 경우  $\alpha=0.8$ 보다 NO 배출지수가 낮은 것을 알 수 있다. 또한 EGR을 증가시키면 Fenimore와 reburn 메카니즘의 역할이 증가함을 알 수 있고, 상대적으로 thermal 메카니즘의 기여도는 작아짐을 알 수 있다. 이와 같은 결과는 대향류 화염의 조건에서 얻어진 것이며, 동축류 화염에서는 과농 예혼합 화염에

서 더 많은 NO가 배출되는 결과<sup>(5,14)</sup>와 다름을 알 수 있다. 따라서 NO 생성 특성의 변화는 화염의 구조와 함께 이해되는 것이 매우 중요함을 알 수 있다.

Fig. 8로부터  $\alpha=0.6$  경우 fe/th 값은  $\alpha=0.8$ 의 결과와 비슷하지만 re/th 값은  $\alpha=0.8$  경우보다 크다는 것을 알 수 있다. 이 결과로부터 예혼합 정도를 높여 주면 reburn 메카니즘의 기여도가 작아지고, 따라서 전체 NO 생성율이 증가할 수 있다는 것과, 이때 상대적으로 thermal 메카니즘의 기여도가 커져 EGR 희석시 온도저감에 따른 NO 생성억제 효과가 더 크게 될 수 있음을 알 수 있다.

## 5. 결론

확산 화염, 예혼합 화염 그리고 과농/희박 예혼합 화염에서 EGR이 NO 생성/소멸 메카니즘에 미치는 영향을 수치해석적으로 알아보았다. 예혼합 화염과 과농/희박 예혼합 화염에서의 NO 생성/소멸은 과농 연소 지역과 희박 연소 지역 그리고 연소 지역을 지나 중앙 쪽에 생긴 고온 지역으로 구별할 수 있었다. 과농 연소 지역에서는 EGR이 NO의 생성이나 소멸 특성에 많은 영향을 주지만, 희박 연소 지역에선 크게 관여하지 않음을 알 수 있었다. 또한 EGR이 과농/희박 연소 지역에서 세 가지 반응 메카니즘(thermal, reburn, Fenimore) 모두에 영향을 주는 반면, 중앙의 고온 지역에서는 thermal 메카니즘만이 크게 영향을 받는 것을 알 수 있었다.

대향류 화염의 경우 예혼합 정도를 증가( $\alpha=0.6, 0.8, 1.0$ )시켰을 때 전체 NO의 생성이 증가하였으며, 이는 reburn 메카니즘에 의한 NO 소멸률이 감소하고 고

온 지역이 증가하기 때문임을 알 수 있었다. 초기 온도가 증가하면 고온 지역의 증가와 reburn 메카니즘에 의한 NO 소멸율의 감소로 NO 생성이 증가하게 됨을 알 수 있었다.

EGR은 예혼합 정도가 크고 미연가스의 온도가 높을수록 NO 억제에 더욱 효과적이었다. 이는 예혼합 정도가 크고 초기 온도가 높으면 고온지역이 증가되며, EGR에 의한 중앙 지역의 thermal 메카니즘이 억제되기 때문임을 알 수 있었다. 따라서 EGR을 이용하여 NO를 저감시키고자 할 때, 고온이거나 예혼합정도가 높은 조건에서 EGR에 의한 감소 효과가 더 클 것으로 기대 된다. 또한 연료/공기의 예혼합 정도에 따라 EGR에 의한 NO 저감이 달라질 수 있으며, 특히 부분 예혼합 화염 구조의 변화가 NO 생성에 큰 영향을 주는 것을 알 수 있었다.

## 참고문헌

- (1) <http://www.mitsubishi-motors.co.jp/> GDI 2000
- (2) Drake, M. D. and Blint, R. J., "Calculation of NO<sub>x</sub> Formation Pathways in Propagating Laminar, High Pressure Premixed CH<sub>4</sub>/Air Flames", Combustion Science and Technology, Vol. 75, pp. 261-285, 1991
- (3) Nishioka, M., et al., "NO Emission Characteristics of Methane-Air Double Flame", Combustion and Flame, Vol 98, pp. 127-138, 1994
- (4) Smyth, K. C., "NO Production and Destruction in a Methane/Air Diffusion Flame", Combustion Science and Technology, Vol. 115, pp. 151-176,

1996

- (5) Feese, J. J. and Turns, S. R., "Nitric Oxide Emission from Laminar Diffusion Flames: Effects of Air-Side versus Fuel-Side Diluent Addition", *Combustion and Flame*, Vol 113, pp. 66-78, 1998
- (6) Dupont, V. and Williams, M., "NO<sub>x</sub> Mechanisms in Rich Methane-Air Flames", *Combustion and Flame*, Vol. 114, pp. 103-118, 1998
- (7) Blevins, L. G. and Gore, J., "Computed Structure of Low Strain Rate Partially Premixed CH<sub>4</sub>/Air Counterflow Flames: Implications for NO Formation", *Combustion and Flame*, Vol. 116, pp. 546-566, 1999
- (8) Li, S. C. and Williams, F. A., "NO<sub>x</sub> Formation in Two-Stage Methane-Air Flames", *Combustion and Flame*, Vol. 118 pp. 399-414, 1999
- (9) Smooke, M. D., "Solution of Burner Stabilized Premixed Laminar Flames by Boundary Value Methods", *Journal of Computational Physics*, vol. 48, pp. 72-105, 1982
- (10) Kee, R. J., et al., "A Fortran Computer Code Package for the Evaluation of Gas-phase Viscosities, Conductivities, and Diffusion Coefficients", Sandia National Lab. Report, SAND83-8209, 1983
- (11) Kee, R. J., et al., "CHEMKIN-II: A Fortan Chemical Kinetics Package for the Analysis of Gas-Phase Chemical Kinetics", Sandia National Lab. Report, SAND89-8009, 1989
- (12) Smith, G. P., et al., "GRI-Mech 2.11", Annual Report SRI International,

1996

- (13) 이승동, 정석호, "희박-과농 메탄 화염의 상호작용에 관한 수치 해석적 연구", *대한기계학회 논문집(B)*, 제 20권 제 1호, pp. 377-383, 1996
- (14) 이원남, 차민석, 송영훈, 정석호, "LIF를 이용한 메탄 화염의 OH, CH 분포 및 NO생성 메커니즘에 관한 실험적 연구", *대한기계학회 열공학부문 추계학술대회*, 1999