

# 연료유량 변화에 따른 원추형 MILD 연소로의 수치적 해석

김태권\*

<sup>1</sup>계명대학교 기계자동차공학과

## Numerical study of a conical MILD combustor with varying the fuel flow rate

Tae Kwon Kim<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Mechanical and Automotive Engineering, Keimyung University

**요 약** MILD(Moderate and Intense Low Oxygen Dilution) 연소는 열효율 향상과 유해배출가스 저감의 상반된 관계를 해결하기 위한 하나의 각광받는 기술이다. 연소가스의 재순환을 이용하여 고온 연소시에 질소산화물을 낮게 유지함과 동시에 연소로 내부온도를 균일화함으로써 열효율을 향상시킬 수 있는 기술이다. 본 연구는 실험실 규모의 노에서 원추형 MILD 연소로의 연소특성을 나타내고 있다. 연구의 조건은 공기의 유량은 일정하게 하면서 가스 연료 유량을 변화시켜 당량비를 변화시켰다. 이 결과 노 내에서 MILD 연소영역이 잘 구현되었고, 당량비 0.69~0.83의 범위에 걸쳐서 노(爐)내에서의 온도와 배출가스의 농도가 각각 예측되었다. 이 당량비 구간에서 최고화염온도 영역과 주 반응영역에서의 온도차가 약 300°C의 안정적인 화염 영역의 존재를 확인하였다.

**Abstract** MILD combustion is a highly favored technology for solving the trade-off relation between high thermal efficiency and low pollutant emissions. The system has low NO<sub>x</sub> concentration in high temperature combustion by recirculating the combustion gas, as well as improving the thermal efficiency by making the internal temperature in a combustion furnace uniform. This study describes the combustion characteristics of a conical MILD combustor in a laboratory-scale furnace by adjusting the equivalence ratio with the fuel gas flow rate while maintaining a constant air flow rate of the furnace. The MILD regime in the furnace is well characterized and the in-furnace temperature and emissions were predicted, respectively, for the range of equivalence of 0.69 - 0.83. For the range of equivalence ratios, this study confirmed the existence of a stable flame region that has an approximately 300°C temperature difference between the maximum flame temperature region and main reaction region.

**Key Words** : Conical combustor, Equivalence ratio, Gas flow rate, MILD combustion, Pollutant emission.

### 1. 서론

연소와 관련한 연구에 있어서 연소장치들에 대한 오염물질 저감 기술들은 매우 중요하다. 화석연료를 사용하는 연소기에서 발생하는 여러 오염물질들은 도심지역에 집중되며 산성강하물질 증가의 원인 등 많은 문제점들을 발생시키고 있다. 이에 따라 주요 오염물질 중 하나인 질소산화물(NO<sub>x</sub>)을 줄이기 위한 많은 연소기술들이 제안되고 있다. 일반적인 연소기술들은 연소효율과 오염

물질 억제에 있어서 상반되는 경향을 보이고 있어, 이를 극복하기에 어려움이 있다. 연소효율 증대를 위해 배기가스의 열 교환을 통하여 고온의 연소 공기를 공급하는 방법이 있으나, 이러한 연소방법은 예열공기의 온도에 따라 화염온도의 상승의 원인으로 작용하여 열적 질소산화물의 발생을 촉진시키는 결과를 가져온다. 열적 질소산화물의 발생을 줄이기 위한 화염냉각 연소 방법은 불완전연소를 유발하여 일산화탄소 증가 및 화염 불안정 또는 화염 역류의 문제점 등을 가지고 있다. 일반적인 질

\*Corresponding Author : Tae Kwon Kim(Keimyung Univ.)

Tel: +82-53-580-5551 email: tkkim@kmu.ac.kr

Received January 7, 2014

Revised February 28, 2014

Accepted June 12, 2014

소산화물 저감 연소 방법은 산소의 농도와 온도가 높은 영역의 체류시간을 줄임으로써 열적 질소산화물 발생을 줄이는 연소기술들이다. 하지만 이러한 방법 또한 높은 비용의 문제와 개발기간이 장기화 되는 등, 실제 설계와 운용에 있어서 해결해야 할 문제가 산적해있다.

이와 같은 연구들 가운데에서 MILD(moderate and intense low oxygen dilution)연소는 연소효율은 유지하면서 오염물질의 배출농도는 낮추는 역할을 하고 있음이 알려지고 있다[1-3]. Wüning은 연소기 내부에 강한 배기가스의 재순환 영역을 형성시켜 연료와 공기를 희석시켜, 낮은 화염온도에서의 안정적인 화염을 구현함으로써 열적 질소산화물이 감소되는 무화염 연소기술을 소개하였다. 강한 배기가스 재순환 영역은 연소공기를 고온으로 예열함에도 불구하고 연소기 내부의 화염온도가 억제되어 질소산화물 저감과 동시에 효율을 높일 수 있었다[4]. Plessing은 실험적 연구를 통하여 연소로 내부의 반응물의 반응 온도를 자발화 온도 이상으로 상승시키는 것은 연소공기의 예열보다 배기가스의 재순환에 의존하며, 희석된 연소공기내의 낮은 산소농도에도 연소현상이 유지되는 것이 MILD 연소의 기본 현상임을 밝혔다[5]. 김군홍 등은 Plessing에 의해 수행된 MILD 연소기의 실험결과를 토대로 MILD 연소현상의 해석을 위한 수치해석 모델을 개발하고 검증하였다[6]. 조아론 등[7]은 본 연구에 앞서 연료의 유량을 고정하고 공기의 유량으로 당량비를 조절한 MILD 연소 연구를 수행하였으며, 특정한 당량비 범위에 국한해서 MILD 연소가 발생하는 것을 확인한 바 있다. 그러나 다양한 연료량에 따른 특성은 파악하지 못하였다.

따라서 본 연구에서는 유동해석 프로그램을 사용하여 공기의 유량을 고정하고 연료의 유량을 조절한 당량비 조건에서 MILD 연소 특성을 확인하고 분석함으로써, 원추형 연소로에서의 MILD 연소특성을 파악하고자 한다.

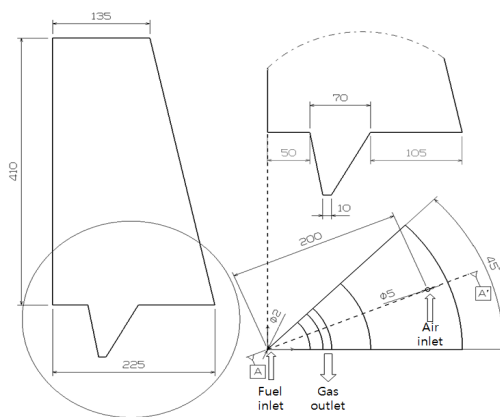
## 2. 본론

### 2.1 수치적 연구

#### 2.1.1 MILD 연소로

본 연구에서는 전산해석 상용코드인 FLUENT 소프트웨어를 사용하여 수행하였다. 유동장을 적절한 크기의 제어체적으로 분할하여 각각의 제어체에 지배방정식

을 적용하여 계산하는 유한체적법을 사용하였으며, Patanker에 의해 고안된 SIMPLE 알고리즘을 적용하였다. 격자의 개수는 804,105개 이며 Tet/hybrid 격자로 제어체를 분할하였다. 화염면 모델을 사용하여 해석되었던 원추형 연소로 모델을 사용하여 경계조건을 바꾸어 해석하였으며 치수 및 형상은 Fig. 1에 도식적으로 나타내었다.



[Fig. 1] Schematic diagram of MILD combustor

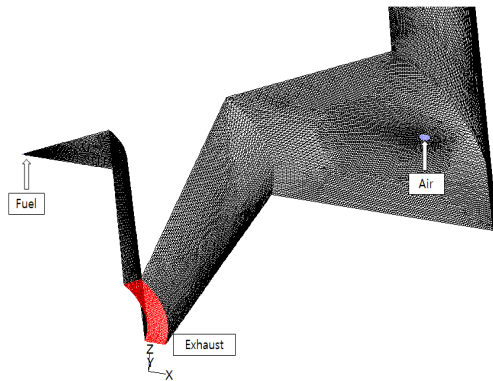
연소 공간의 크기는 하부 반지름 225 mm, 상부 반지름 135 mm, 높이 410 mm의 원추형이며, 연소로 중앙에 지름 2 mm의 연료노즐과 연료노즐의 중심에서 200 mm의 거리에 지름 5 mm의 공기 노즐이 방사형으로 8개를 배치하였다. 연료 노즐과 공기 노즐의 높이는 연소로의 바닥 면과 일치한다. 연소로의 내벽의 형태는 연소로의 상부로 갈수록 단면적이 줄어드는 원추형이며, 공기노즐을 통하여 수직으로 분사된 공기가 연소로의 내벽을 타고 흐를 수 있도록 배치하였다. 이는 연소로로 유입되는 공기의 예열 효과를 극대화하기 위함이다.

Fig. 2는 MILD 연소로의 연료 및 공기노즐 주변의 격자계의 일부를 보여주고 있다. 해석 영역은 Fig. 1에서 나타난 바와 같이 연소로의 1/8 부분에 대하여 수행하였다. 연료 및 공기노즐 주변과 강한 배기가스 재순환 영역이 존재할 것으로 예상되는 연소로 중심부에 많은 격자를 배치시켰다. 대칭되는 부분의 일부만 해석을 수행함으로써 계산시간 단축 등 효율적인 수치해석을 수행하였다.

#### 2.1.2 해석조건

본 연구에 사용된 연소 모델은 강한 내부 재순환 영역

이 존재함에 따라 20초 이상의 체류시간을 갖는 연소 유동장으로, 계산 시간이 상대적으로 많이 소요되었다. 본 MILD 연소 해석에 사용된 연료는 메탄이며, 실제 MILD 연소와 유사한 연소 조건을 위하여



[Fig. 2] The grid system of MILD combustor; cell type(Tet/hybrid), cell number(804,105)

[Table 1] Conditions of numerical calculation.

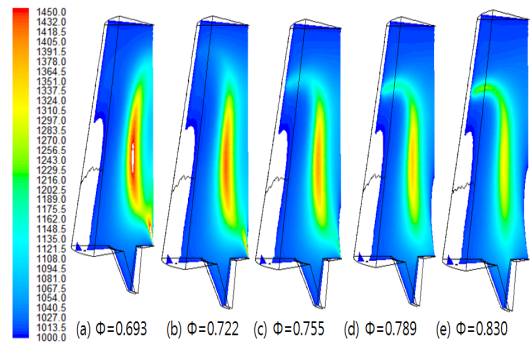
Case	Equivalence Ratio $\Phi$
(a)	0.693
(b)	0.722
(c)	0.755
(d)	0.789
(e)	0.830

연소로 내부를 자발화 이상의 온도로 예열한 후, 공기의 입구 유속을 12m/s 로 고정하고 연료 노즐의 입구 유속을 44m/s에서 52.8m/s 까지 증가시키며 수치해석을 수행하였다. 연소로의 가열된 벽면을 타고 흐르는 공기의 예열 효과를 예측하기 위하여 연소로 벽면의 온도 조건을 1000 °C 로 설정하였고, 연소로 외벽의 단열재는 완전 단열 조건으로 가정하였다. 수치해석에 사용된 당량비 조건은 Table 1 과 같다.

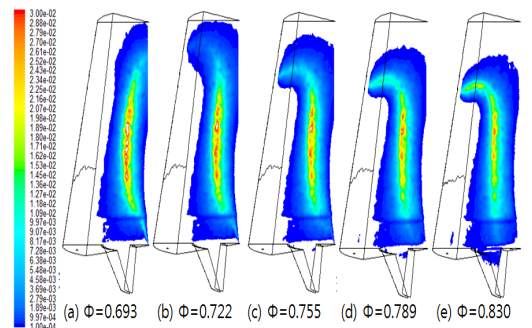
## 2.2 수치해석 결과

### 2.2.1 온도분포

각 조건에 따른 온도분포를 1000 °C ~ 1450 °C 의 범위에서 Fig. 3 에 도시하였다. 계산결과 당량비가 0.693 의 조건에서 최고 온도는 약 1450 °C 로 나타났으며, 전체 조건의 최고온도의 평균은 약 1380 °C로 예측 되었다. MILD 연소로는 고온의 연소로 외벽이 존재함에 따라



[Fig. 3] Temperature in MILD combustor.



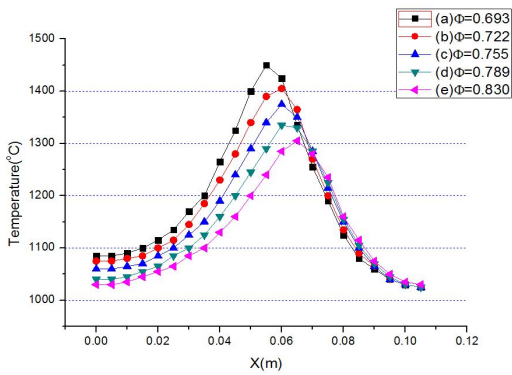
[Fig. 4] Rate of heat reaction in MILD combustor.

배기가스의 온도도 주요 화염대의 최고온도에 비교하여 크게 떨어지지 않는다. 해석결과 각 조건의 배기가스의 온도는 모두 1000 °C 이상으로, Plessing의 수치적 연구 [5]에서 제시한 MILD 연소 조건과 유사한 특성을 나타내었다. 주 반응영역내의 온도분포는 1400 °C 전후로 나타나며 주 반응영역을 제외한 영역에서 1100 °C 이상을 유지하고 있는 것으로 예측되었다.

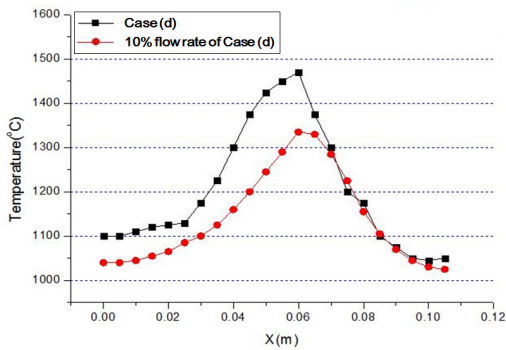
연료 유속을 변경하여 당량비를 조절하는 방법을 사용함에 따라 연료 유속의 변화에 따라 화염의 형상이 조금씩 변화하며, 당량비가 커질수록 화염대의 상부는 연료 노즐에서 멀어지는 방향으로 편중되는 것으로 나타났다. 이는 Fig. 4 와 같이 반응률의 분포와 동일한 경향을 보이는 것으로 예측되었다.

Fig. 5 에 Fig. 1 의 A-A' 면, 즉 연료노즐과 공기노즐의 중심을 통과하는 지점의 온도분포를 도시하였다.

당량비가 0.693, 0.722 인 조건을 제외한 모든 조건에서 최고온도와 최저 온도의 차이가 300 °C 이내로 나타났다. 이는 연소로 내부의 강한 배기가스 재순환 영역의 존재로



[Fig. 5] Cross sectional temperature distribution with x position in MILD combustor at Z = 205.0 mm



[Fig. 6] Cross sectional temperature distribution with x position in MILD combustor at Z = 205.0 mm, and  $\Phi=0.79$ .

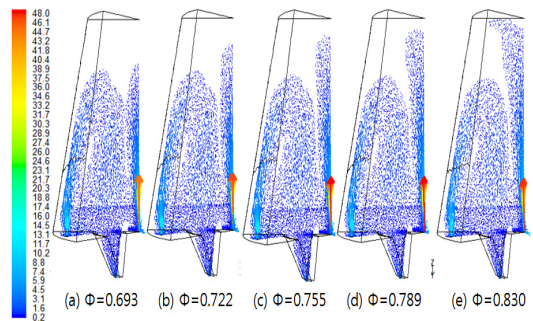
인해 연소로 내부의 온도가 비교적 일정하게 분포하게 되었다고 판단할 수 있다.

Fig. 6 은 Fig. 1에서 볼 수 있는 A-A' 단면의 온도분포를 x방향에 따라 도시하였다. 당량비 0.789의 경우인 Case (d)와, 같은 당량비이지만 이에 비해 공기 및 연료의 유량을 1/10 로 축소할 경우를 비교하고 있다. 이 결과, 대부분의 영역에서 화염의 온도가 낮게 비교적 안정적으로 나타나고 있으며, 최고화염의 온도 역시 약 100 °C 이상 감소한 것으로 예측되었다.

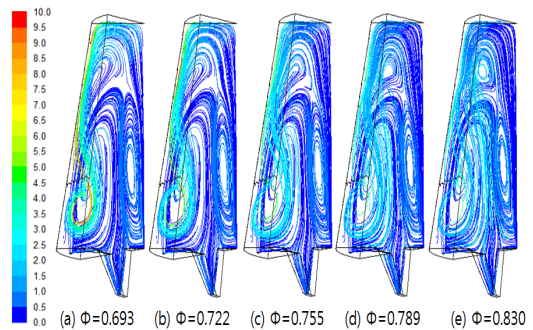
### 2.2.2 속도 분포 및 유선

연소로 내부의 속도벡터를 0.2m/s에서 48m/s의 범위에서 Fig. 7 에 도시하였다. 연료의 유속을 점점 증가시키에 따라 연소로 상부까지 도달하는 유속의 크기는 증가하였으나 연소로 중심의 재순환 영역의 형태는 거의 일

정하게 유지하고 있는 것으로 확인되었다. Fig. 8 에 연소



[Fig. 7] Velocity vector in MILD combustor.



[Fig. 8] Streamlines in MILD combustor.

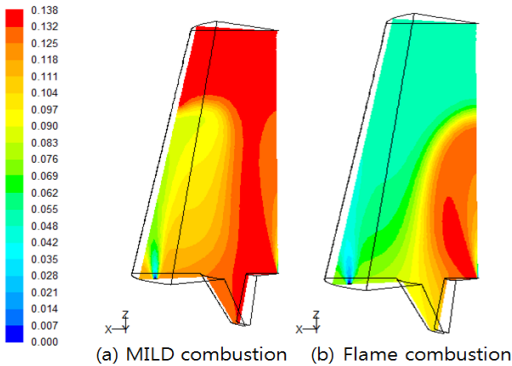
로 내부로 유입된 공기 및 연료가 흐르는 유선을 나타내었다. 당량비가 작을수록 연소로 내의 체류시간이 증가하는 경향을 보였으며 연료 유속을 증가시켰을 때 연소로 상부에 작은 배기가스 재순환 영역이 발생하는 것으로 예측되었다.

### 2.2.3 CO<sub>2</sub> 및 H<sub>2</sub>O의 발생분포

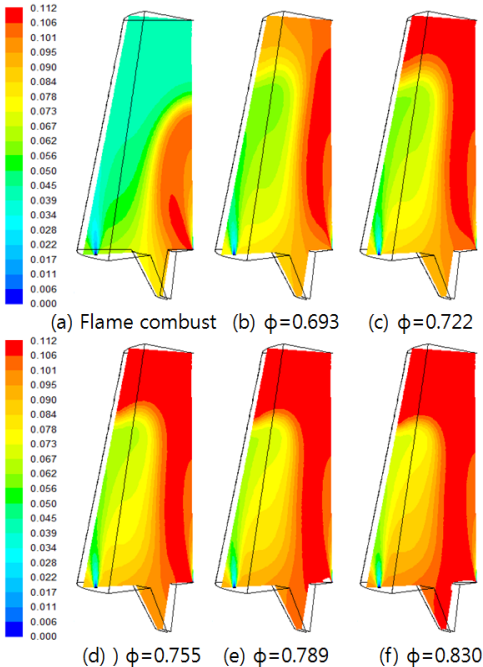
Fig. 9 에 이산화탄소 분포를 MILD 조건과 일반적인 연소의 경우와 비교하여 도시하였다. MILD 연소 조건에서의 강한 배기가스 재순환으로 인하여 일반적인 연소 조건보다 높은 농도로 나타났다. 이산화탄소는 연소할 때 생성되는 수분과 함께 복사열전달 적인 측면에서 중요한 역할을 수행하며, C. Tabacco 의 수치해석 연구에서도 그 중요성을 나타내었다[8].

연소반응에서의 대표적인 연소생성물 중의 하나인 기체상태의 물의 발생분포는 MILD 연소특성을 분석함에 있어서 중요한 지표 중 하나이다. 일반적인 연소에서는

물의 발생은 주 반응영역 이나 고온의 화염대에 집중되는



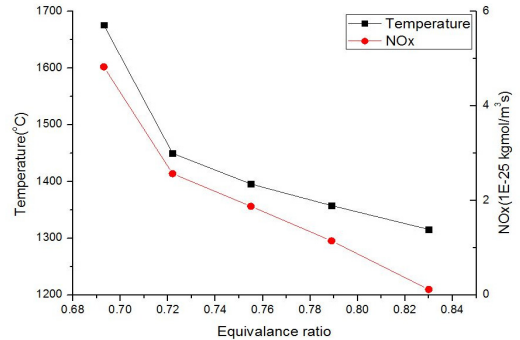
[Fig. 9] Mass fraction of CO<sub>2</sub>.



[Fig. 10] Mass fraction of H<sub>2</sub>O.

형태를 보이고 있다. 그러나 MILD 연소에서는 연소장 내의 긴 체류시간과, 반응영역이 넓게 분포됨에 따라 물의 발생영역 또한 연소장 전체로 퍼져 있는 것을 확인할 수 있다. Fig. 10 에 MILD 연소조건에서의 당량비에 따른 기체상태의 물의 발생분포와 일반적인 연소에서의 물의 발생특성을 도시하였다. (a)~(f)구간에서와 같이 당량비가 증가함에 따라 물 발생 분포영역이 연소장 전체

로 퍼지는 것을 확인 할 수 있다.



[Fig. 11] Temperature and NO<sub>x</sub> mass fraction with equivalence ratio.

### 2.2.4 질소산화물 분포

Fig. 11에 당량비에 따른 열화 질소산화물의 분포와 최고 화염온도와와의 관계를 나타낸 그래프를 도시하였다. 일반적인 열화 질소산화물이 발생하기 시작하는 최저 온도는 1300 °C 정도이며, 1600 °C 이상의 화염온도에서 온도 상승에 따른 일산화질소의 생성률은 급증하는 것으로 알려져 있다. 본 연구에서는 연료 속에 유기적으로 함유된 질소의 산화에 의한 질소산화물 발생 등을 제외 하고, 고온에 의해 발생하는 질소산화물만 고려하였기 때문에 일반적인 질소산화물의 생성특성과 동일한 경향을 나타내는 것으로 예측되었다. 수치해석 결과로 미루어 볼 때 연소로 내부의 화염온도의 제어와 배출가스의 오염물질 저감은 밀접한 관계가 있음을 확인 할 수 있다.

## 4. 결론

본 연구는 원추형 MILD 연소로에서 연료의 유량을 변경한 조건에서의 연소특성을 수치해석 하였다. 당량비 변화에 따라 해석을 진행함으로써 연료 유속에 따른 화염의 특성 및 온도분포, 배출가스의 특성을 확인하였다. 이 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 당량비가 0.69에서 0.83의 범위에서 최고화염의 온도는 1400 °C 전후로 나타나며 주 반응영역과의 온도 차이가 300 °C 전 후로 나타나는 비교적 안정적인 화염이 발생되는 것으로 예측되었다. 연료 유속을 변경하여 당량비를 조절한 해석방법을 사용함에 따라 연료 유속이 증가할수록 화염의 형상은 공기

노즐 방향으로 편중되는 경향을 보였으며 그 형상은 반응률의 분포와 일치하는 것으로 확인되었다.

- 2) 연료의 유속이 증가 또는 감소하여도 연소로 내부의 배기가스 재순환 영역의 형태는 거의 일정하게 유지되는 형태를 나타냈으며, 당량비가 작을수록 연소로 내의 체류시간이 증가하는 것으로 확인되었다.
- 3) MILD 연소의 중요한 지표들 중 하나인 CO<sub>2</sub> 와 H<sub>2</sub>O의 발생 분포를 확인하였다. 이는 연소반응에서의 대표적인 연소생성물 중의 하나이며, 일반적인 연소에서는 물의 발생은 주 반응영역이나 고온의 화염대에 집중되는 형태를 보이고 있으나 MILD 연소에서는 연소로 내의 긴 체류시간과, 반응영역이 넓게 분포됨에 따라 물의 발생영역 또한 노(爐) 내부 전체로 퍼져 있는 것으로 예측되었다.

## References

- [1] J. A. Miller, and C. T. Bowman, "Mechanism and modeling of nitrogen chemistry in combustion," *Progress in energy and combustion science*, vol. 15, pp. 287-338, 1989.  
DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/0360-1285\(89\)90017-8](http://dx.doi.org/10.1016/0360-1285(89)90017-8)
- [2] C. T. Bowman, "Control of combustion generated nitrogen oxide emissions : Technology driven by regulation," *Twenty-fourth Symposium (International) on combustion*, pp. 859-878, 1992.
- [3] K.-Y. Ahn, H.-S. Kim, E.-S. Cho, et al., "An experimental study on combustion processes and NO<sub>x</sub> emission characteristics of the Air-Staged burner," *Korean society of mechanical engineering*, vol. 13, no. 6, pp. 477-486, 1999.
- [4] J. A. Wüning, and J. G. Wüning, "Flameless oxidation to reduce thermal NO-formation," *Progress in energy and combustion science*, vol.23, pp. 81-97, 1997.  
DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0360-1285\(97\)00006-3](http://dx.doi.org/10.1016/S0360-1285(97)00006-3)
- [5] T. Plessing, N. Peters, and J. G. Wüning, "Laser optical investigation of highly preheated combustion with strong exhaust gas recirculation," *Twenty-seventh Symposium (International) on combustion*, pp. 3197-3204, 1998.
- [6] G. H. Kim, Y. M. Kim, and K. Y. Ahn, "A study on characteristics of MILD combustion using the radiative flamelet model", *Journal of Korean Society of Automotive Engineering*, vol. 13, no. 1, pp. 60-67, 2005.
- [7] T. K. Kim, J. S. Ha, and A. R. Jo, "MILD combustion characteristics with inlet air velocity in a conical

combustor," *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, vol. 36, no. 6, pp.774-779, 2012.

DOI: <http://dx.doi.org/10.5916/jkosme.2012.36.6.774>

- [8] D. Tabacco, C. Innarella, and C. Bruno, "Theoretical and Numerical Investigation on Flameless Combustion," *Combustion Science and Technology*, vol. 174, no. 7, pp. 1-35, 2002.

DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/00102200208984086>

김 태 권(Tae Kwon Kim)

[정회원]



- 1981년 3월 ~ 1995년 8월 : 한국 기계연구원 실장
- 1992년 8월 : 한국과학기술원 기계공학전공 연소공학(박사)
- 2006년 3월 ~ 현재 : 계명대학교 기계자동차공학 교수

<관심분야>

기계/재료