

## 마일드연소의 이해와 응용

김남일<sup>\*†</sup>

### Understanding and Application of MILD combustion

Nam Il Kim<sup>\*†</sup>

#### ABSTRACT

Recently, studies on Mild combustion have grown in many combustion application fields in the international combustion society. Compared with international activities in this field, domestic study in Korea has not been activated yet. This brief review aims to explain some essences of fundamental physics of Mild combustion and to introduce some recent application techniques of them. Fundamental physics of Mild combustion has been usually broken down into three aspects [1]; physical, thermodynamic, and chemical aspects. A major portion of Mild combustion physics is related to HiTAC (High Temperature Air Combustion) or HiCOT (High Temperature Combustion Technology). Although definition of Mild combustion is easily accepted among combustion engineers, combustion control in Mild combustion may be difficult without understanding essential physics of it. To encourage the research in this field, some representative cases will be introduced, and related essential techniques will be explained.

**Key Words** : Mild combustion, HiTAC, HiCOT, Ignition conditions

마일드(MILD)연소는 일반적으로 Moderate and Intense Low oxygen Dilution의 약자로 이해되기도 하지만, 근래에는 Mild 라는 용어 그 자체의 의미에 근거해 일반적인 화염에 비해 반응이 강렬하게 발생하지 않는 연소 현상을 의미하기도 한다. 마일드연소의 정의에 대한 명확한 서술에는 여전히 논란의 소지가 있지만, 가장 쉽고 널리 쓰이는 정의는 ‘유입된 반응 혼합물의 온도가 혼합물의 자발화(self-ignition) 온도보다 높음에 비해 연소과정에서의 최대 허용 온도 상승이 혼합물의 자발화 온도(절대온도)보다 낮을 때의 연소과정’으로 설명된다[1].

이러한 정의는 일반적으로 고온연소로 불리는 HiTAC(High Temperature Air Combustion)이나 HiCOT(High Temperature Combustion Technology)과는 달리 연소과정에서 발생하는 온도 상승이 일반적인 연소과정에 비해 상대적으로 낮은 조건에 해당한다. 이러한 조건을 연소예열온도( $T_{in}$ )와 연소과정에서의 온도 상승( $\Delta T$ )을 자발화온도( $T_{si}$ )를 기준으로 하여 Fig. 1과 같이 개념적으로 보다 명확히 구분할 수 있다. 마일드연소는 반응물을 충분히 가열하지 않은 조건에서 스스로

화염을 형성할 수 없는데 반해 일반적인 화염은 충분한 발열량을 가지며 스스로 반응을 유지할 수 있다. 하지만 한 가지 유의할 것은 온도의 기준이 되는 자발화온도가 연료와 산화제의 조성에 따라 변화한다는 것이다. 이러한 조건에 가장 가까운 대표적인 예로는 온도가 충분히 높은 조건에서의 WSR(Well Stirred Reactor) 내부에서의 반응을 들 수 있으며, 상대적으로 반응 속도가 느린 경우가 해당될 수 있다.

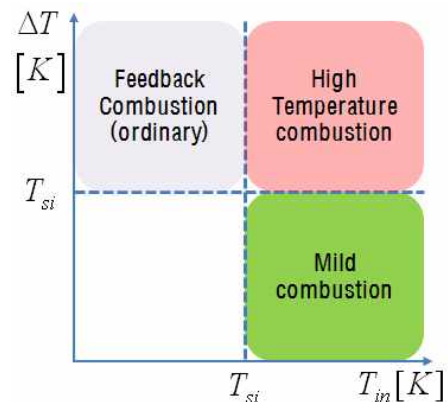


Fig. 1. combustion modes and their locus in inlet temperature ( $T_{in}$ ) and self-ignition temperature ( $\Delta T$ )

\* 한국과학기술원(KAIST) 기계공학과

† 연락저자, nikim@kaist.ac.kr

TEL : (042)-350-3211 FAX : (042)-350-3210

따라서 이러한 마일드연소 개념은 일반적인 연소공학적인 이해를 화학반응의 영역으로 확대하는 과정으로도 생각될 수 있을 것이다. 반응공학의 관점에서 마일드연소는 특별히 새로운 것이 없다고 볼 수도 있겠지만, 연소공학적인 관점에서는 연소기 설계에 마일드연소 개념이 가지는 유용한 특성을 적극적으로 활용하기 위한 노력이 부족했던 것은 사실이다.

마일드연소의 특징은 세 가지로 요약될 수 있다. 첫째는 연소실 내부의 최고온도를 제한할 수 있다는 것이다. 이는 직접적으로 그을음의 생성과 NOx 생성을 억제하는 수단으로 활용될 수 있다. 이에 대해 다양한 연구들이 진행되고 있으며, 수치해석 측면에서도 마일드연소 조건에서 예상되는 화염대의 두께 증가와 체류시간의 증가를 반영할 수 있는 모델의 개발이 이루어지고 있다[2]. 또한 연소기를 구성하는 금속 및 소재의 온도한계의 문제를 해결하는 수단이 될 수 있다. 둘째는 마일드연소의 또 다른 특징인 점화온도 이상의 예열조건이다. 이는 화염의 유지 및 안정화를 위한 추가적인 수단의 도입을 최소화 할 수 있다는 장점을 가진다. 마지막으로 마일드연소 조건에서는 연소공간 내부에서의 온도 및 농도분

포를 최소화 할 수 있다는 점이다. 이러한 특징은 금속처리 및 빈공공정에 적극 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

마일드연소의 장점은 때로는 단점으로도 작용하기도 하는데, 예를 들면 점화온도 이상의 예열은 연소공간 전체에 화염의 형성 가능성을 의미하므로 특정 부위에 연소반응을 제한하는데 어려움을 유발할 수 있다. 또한, 화염의 형성이 국부적인 온도 및 조성에 매우 민감하여 연소기의 안정성을 오히려 악화시킬 수 있다. 예를 들면 근래에 엔진 분야에서 많은 관심을 받고 있는 HCCI(Homogeneous Charge Compression Ignition) 엔진은 근본적으로 마일드연소 조건을 지향한다고 볼 수 있으며, 여기서 직면하는 많은 문제들이 마일드연소의 단점과 연관성을 가지고 있다고 볼 수 있다[3].

마일드연소 분야에서의 국내외 동향을 간단히 살펴보기 위해 Fig. 2에 ‘마일드연소’를 키워드로 검색한 논문의 증가추이와 국가별 참여도를 보이고 있다. 전체적으로 최근 10여 년 동안 관련 분야의 연구가 급증하고 있음을 알 수 있다. 이들 연구는 초기에는 미국을 중심으로 주도적으로 진행되어 왔는데, 최근에는 중국에서 매우 활발하게 연구보고가 진행되고 있다. 이에 반해 국내에서의 연구는 상대적으로 부족하며, 교신저자로서 참여한 경우는 더욱 부족한 실정이다.

마일드연소 연구의 중요성과 파급력을 예측하기는 어렵겠지만, 현 시점에서 마일드연소 기술에 대한 기본적인 이해와 응용 분야를 되짚어 보는 것이 국내 연구자들에게 유용할 것으로 판단되어 그 소개 기회를 가지고자 한다.

### 후 기

이 논문은 2013년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No.NRF-2013R1A2A2A01015816). 일부는 KAIST 교내연구비의 지원을 받아 수행되었음.

### 참고 문헌

[1] A. Cavaliere, M. de Joannon, "Mild Combustion," Progress in Energy and Combustion Science, 30, 2004, pp. 329-366.  
 [2] P.J. Coelho, N. Peters, "Numerical simulation of a mild combustion Burner," Combustion and Flame, 124, 2001, pp. 503-518.  
 [3] J. Nygren, J. Hult, M. Richter, M. Alden, M. Christensen, A. Hultqvist, B. Johansson, "Three-dimensional laser induced fluorescence of fuel distribution in an HCCI engine," Proc. Combust. Inst. 29, 2002, pp. 679-685.

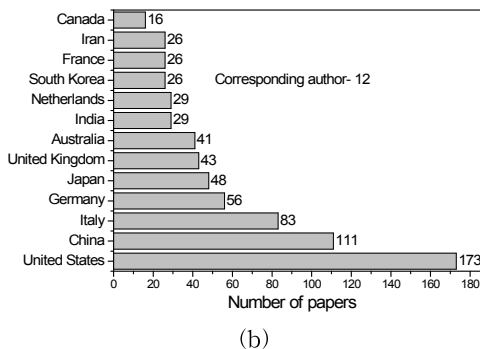
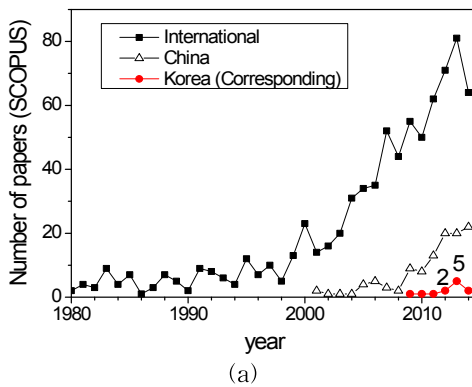


Fig. 2. Number of papers with the keyword of 'Mild combustion' in SCOPUS database (a) Number of papers in recent years, (b) papers from countries.