

## 석탄 및 중잔사유 가스의 가스터빈 연소/NO<sub>x</sub> 배출 특성

이찬, 서제영\*

수원대학교 기계공학과, \* 강림기연 연구소

### Gas Turbine Combustion and NO<sub>x</sub> Characteristics of Coal and Heavy Residue Oil Gases

Chan Lee and Je Young Seo\*

Department of Mechanical Engineering, University of Suwon  
Research & Development Center, Kangrim Industries Co.

#### 1. 서론

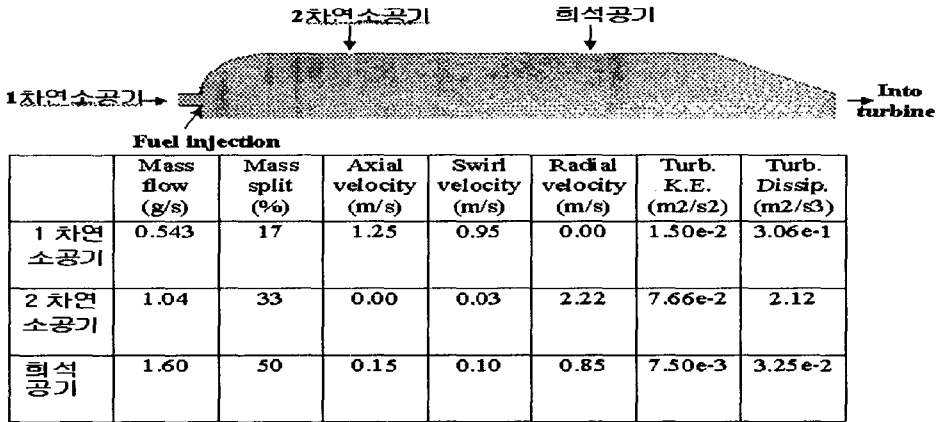
IGCC 가스터빈의 연료로는 주로 CO와 H<sub>2</sub> 가연성분이 대부분인 석탄과 중사유 가스를 사용하며, 발열량은 천연가스의 1/5~1/10정도이다[1]. 이러한 중발열량 가스연료는 기존의 천연가스나 석유를 연소연료로 사용한 발전시스템에 그대로 적용되어 사용하는 데는 무리가 따른다. 이는 천연가스나 석유에 비해 중, 저발열량의 연소특성이 매우 다를 수 있기 때문이다. 또한 연료의 특성은 연소과정 및 연소조절시스템에도 영향을 준다. 그러므로 중발열량 가스를 기존의 가스터빈연소기에 얼마나 효율적으로 안정되게 태우느냐와, 이때 발생하는 환경오염물질을 어떻게 최소화하는가 하는 점이 연구의 중요 쟁점상황이 된다.

이러한 이유로 천연가스를 이용하여 충분히 검증된 가스터빈에 천연가스대신 중발열량의 연료를 연소기에 대체하는 기술이 IGCC 연구에 주된 관심사중하나로 부각되고 있다 [2,3]. 중발열량 연료의 주성분은 CO와 H<sub>2</sub>이며, 또한 H<sub>2</sub>의 함량이 높기 때문에 화염속도 및 화학 반응율이 높고 천연가스에 비해 온도가 높다. 이로 인하여 천연가스에 비하여 질소산화물(NO<sub>x</sub>)의 발생량이 많아진다. 또한 연소기내의 연료와 공기의 혼합과정 및 화염형성이 중발열량 가스의 경우 천연가스에 비해 달라지는 관계로, 가스터빈 연소기와 팽창기(expander)간의 연계 설계문제들(예: 터빈입구에서 유속 및 온도 분포의 균일성)에도 큰 영향을 미칠 수 있다. 이외에도, IGCC 가스터빈 연소기 설계 예혼합 단계적 연소방식(premixed and staged combustion technique)을 적용하는 경우에는, 중발열량 가스내의 H<sub>2</sub> 성분 때문에 야기될수 있는 화염 안정화문제가 심각한 문제로 대두 되고있다.

그러므로, 본연구는 천연가스를 이용하여 설계된 가스터빈 연소기에 천연가스 대신 중발열량의 가스연료를 사용하는 경우의 연소기내 유동장, 화학종의 농도, 온도분포 및 화염현상을 전산 유체역학적 방법을 이용하여 해석하였다. 그리고 해석결과를 천연가스의 경우와 비교함으로써, 중발열량 대체연료 사용시 가스터빈 연료노즐 및 연소기의 형상변경(modification) 또는 재설계(redesign)에 필요한 설계기준을 제시하였다.

## 2. 가스터빈 연소기 및 가스 연료의 조건

본 전산해석을 수행하기 위한 가스터빈 연소기는 [그림 1]과 같이 단순화된 축대칭 구조이며, 격자계의 총격자수는 약 19,450개이다. 본 연구에서 사용한 연소기 및 전산 격자계에 대한 상세한 설명은 저자들의 이전 연구결과[4,5]에 상세히 기술되어 있다.



[그림1] 축대칭 연소기의 형상 및 격자계

본 논문에서는 석탄 및 중잔사유를 가스화 하여 얻을 수 있는 2가지의 IGCC가스를 [Table 1]과 같은 조성으로 고려하였다. 또한 천연가스로 설계된 기존의 연소기에 [Table 1]에 보여지는 석탄 및 중잔사유의 중발열량 연료를 대체연료로 사용하기 위해서는, 연소기에 동일 입열의 연료량을 주어야한다. 즉 천연가스를 이용한 연소기와 IGCC용 대체가스 연소기가 동일한 입열량을 갖기 위해서는 식(1)의 관계를 이용하여 대체연료의 가스유량( $\dot{m}_{CG}$ )을 결정하여야 한다.

$$\text{입열량}(Q) = \dot{m}_{NG} LHV_{NG} = \dot{m}_{CG} LHV_{CG} \quad (1)$$

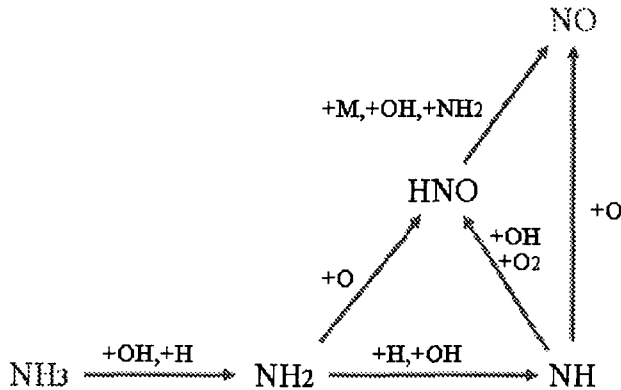
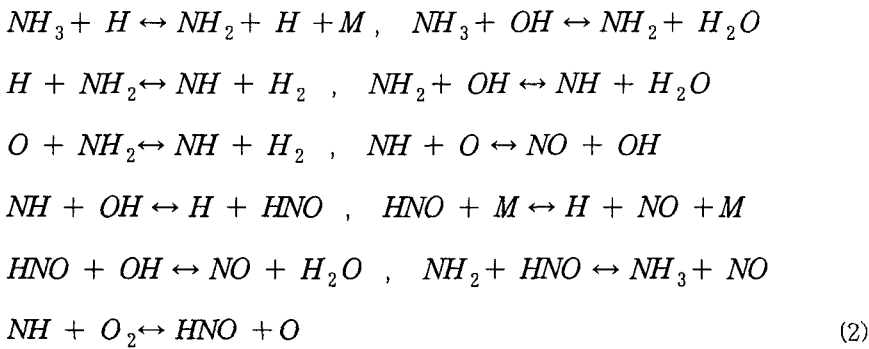
이때  $\dot{m}_{NG}$ ,  $\dot{m}_{CG}$ 는 천연가스 및 중발열량 가스의 유량을  $LHV_{NG}$ ,  $LHV_{CG}$ 는 천연가스 및 석탄가스, 중잔유가스의 단위 질량당 발열량을 나타낸다. 또한 연료중의  $NH_3$  함량은 0.01 % (weight-percent)로 가정하였다.

[Table 1] 천연가스 및 대체가스 연료의 조성 및 특성

조성(vol%)	Fuel #1 (Coal gas)	Fuel #2 (Heavy residue gas)	Natural Gas
H <sub>2</sub>	30	40	.
CO	70	60	.
CH <sub>4</sub>	.	.	100
유량(kg/s)	15.49e-05	13.80e-05	4.15e-05
발열량(kcal/kg)	3194.5	3608.1	11954

### 3. 전산해석 방법 및 검토

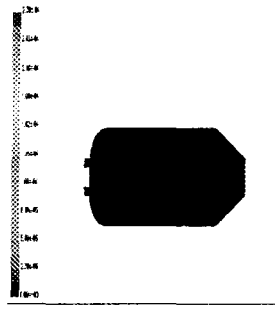
연소기의 전산모사 방법으로는 전산유체역학의 상용코드인 Fluent 를 사용하여 continuity, momentum, energy 그리고 species transports 에 관한 방정식들을 풀었다. 그리고 복사모델로는 공학적으로 신뢰성 있으면서도 단순한 P1-모델을 사용하였다. 가스연료의 연소모델은 eddy-dissipation 모델을 사용하였고, CH<sub>4</sub>, CO 및 H<sub>2</sub> 의 화학 반응률에 대한 모델은 multi-step reaction을 고려한 Westbrook와 Dryer[6], Hautman[7]등의 관계식을 사용하였다. 또한 연소시 NO<sub>x</sub>는 온도에 의해 생성되는 thermal NO<sub>x</sub>와 연료 성분에서 의한 fuel NO<sub>x</sub>의 생성으로 보았다. Thermal NO<sub>x</sub>는 modified Zeldovich mechanism를 사용하여 해석하였으며, 가스연료중에 포함되어 있는 암모니아로 인해 발생하는 fuel NO<sub>x</sub>의 생성 mechanism은 매우 복잡하기 때문에, 본 연구에서는 [그림3] 과 같은 fuel NO<sub>x</sub> 반응 경로를 가정하고, 다음과 같은 연쇄반응식들을 고려하였다.



[그림 3] NH<sub>3</sub>/O<sub>2</sub> 혼합물 중에서 주요 fuel NO<sub>x</sub> 생성경로

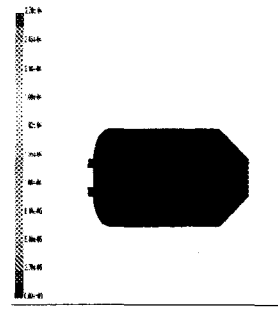
상기의 Fuel NO<sub>x</sub> 에 대한 반응모델은 Fluent 프로그램에 user-supplied 모델로 형태로 첨가하였고, 반응모델에 관련된 상세한 반응관련 자료는 참고문헌[8]에 나타나 있다.

가스터빈 연소기의 천연가스, 석탄가스 및 중간유 가스 연소시 속도장, 화학종 확산장 및 온도분포에 대한 해석결과들은 저자들의 이전 연구[4]에 서술되어 있으므로, 본 논문에서는 연소기의 NO<sub>x</sub> 생성 및 터빈과의 matching 조건에 대한 전산해석결과들을 제시하고자 한다.



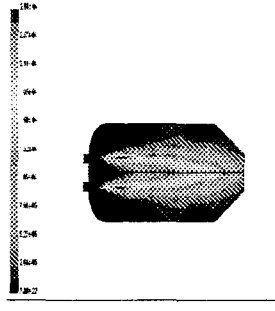
Colors of Mass fraction of no

천연가스 연소기



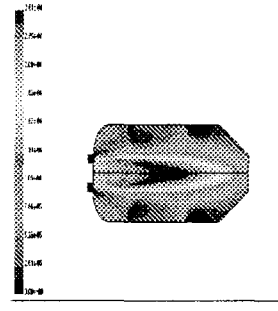
Colors of Mass fraction of no

천연가스 연소기



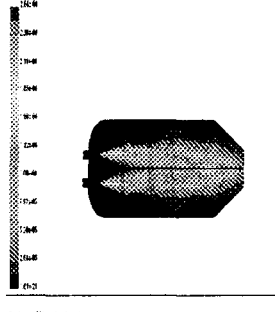
Colors of Mass fraction of no

Fuel #1 연소기



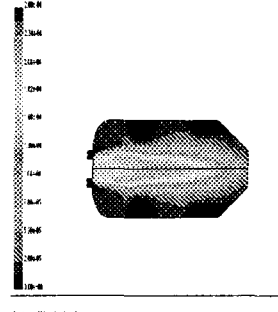
Colors of Mass fraction of no

Fuel #1 연소기



Colors of Mass fraction of no

Fuel #2 연소기



Colors of Mass fraction of no

Fuel #2 연소기

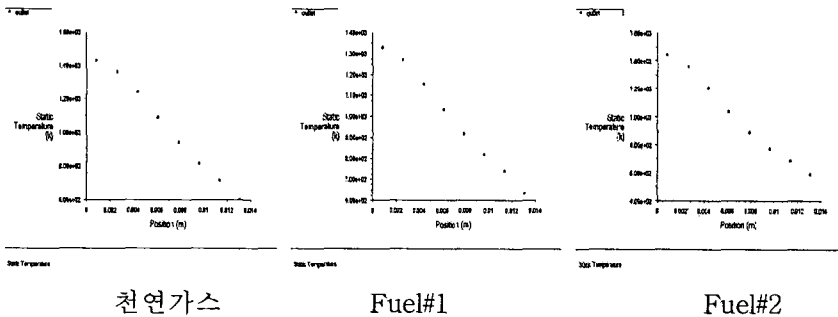
[그림 4] 연소기내의 Thermal NOx      [그림5] 연소기내의 Fuel NOx

[그림 4]는 연소기내의 Thermal NOx 생성분포를 보여주고 있으며, 대체연료를 사용한 경우 Thermal NOx의 생성이 천연가스의 경우에 비해 많음을 알 수 있다. 이는 Thermal NOx의 생성이 온도에 대해 매우 민감하기 때문인 것으로 판단된다. 또한 [그림 5]는 Fuel NOx의 생성 분포를 보여주고 있으며, 대체연료 중에서도 석탄가스에서 더욱 많은 Fuel NOx가 생성됨을 알 수 있다. [Table 2]는 본 연구 대상인 연소기에서의 대체연료 사용시 총 NOx 발생량 특성을 보여주고 있으며, Fuel NOx가 Thermal NOx보다 더욱 많이 생성됨을 알 수 있으며, 또한 석탄가스가 중간유가스에 비해 NOx 생성량이 많음을 알 수 있다. 이러한 결과는 석탄가스의 반응온도와 고온 화염대가 중간유가스에 비해 상대적으로 높고, 길며[4], fuel NOx 발생은 주로 고온 부위에서 이루어지기 때문으로 판단된다.

[Table 2] 가스터빈 연소기의 NOx 배출량

Fuel \ NOx	Thermal NOx (g/kg)	Fuel NOx (g/kg)	Total NOx (g/kg)
Natural Gas	2.3846e-03	0	2.3846e-03
Fuel # 1	0.80146	1.38417	2.18563
Fuel # 2	0.75571	0.93515	1.69086

연소기 출구에서 외부로 배출되는 가스의 온도, 즉 터빈입구온도(TIT: Turbine Inlet Temperature), 는 연소기 및 터빈의 설계에 중요한 영향을 미친다. 그리고 연소기의 출구 온도 분포는 설계의 중요한 관찰사항이다. 이러한 이유로 본 연구에서는 각각의 가스연료의 연소기 출구 온도분포를 살펴보았다. [그림 6]을 보면 석탄 및 중잔유를 이용한 대체가스의 온도 분포가 연소기 출구에서 천연가스에 비해 극소적으로 더욱 많은 편차가 있음을 알 수 있다. 이는 전체적인 반응온도가 석탄을 이용한 IGCC 가스연료가 중잔사유를 이용한 IGCC 가스연료보다 높기 때문이며, 또한 CO와 H<sub>2</sub> 성분으로 인해 화염길이 길어져 연소가스와 희석공기간의 혼합이 충분히 이루어지지 못한 채 가스가 연소기를 벗어나기 때문이다.



[그림 6] 연료에 따른 연소기 출구의 온도 분포

#### 4. 결론

천연가스 가스터빈 연소기에 석탄가스 및 중잔유가스를 태우는 경우의 NOx 생성 및 출구온도 분포 특성을 전산유체역학적 방법으로 검토하였다. 석탄가스 및 중잔유가스 연소 시 천연가스에 비해 높은 온도 분포와 긴 화염대를 보이므로, thermal NOx 및 fuel NOx 발생량이 현저하게 증가하였다. 또한 석탄가스의 NOx 발생량이 중잔유 가스에 비해 높게 나타남을 알 수 있었다. 터빈과의 matching을 위한 연소기 출구온도 분포도 천연가스에 비해 편차가 심한 결과를 보여주었으며, 이러한 결과로부터 좀더 균일한 연소기 출구 온도분포를 얻기 위해서는 화염대를 짧게 해 줄 수 있는 선회버너의 채택 및 희석공기 배분 설계의 개선을 통한 혼합증진과 같은 대책이 필요한 것으로 판단된다.

#### 후기

본 연구는 고등기술연구원이 지원하는 “중잔사유 가스화 복합발전 계통 및 증소형 가스화 연료전지-열병합 시스템의 공정설계 및 BSU급 가스화기 연료와 슬래그의 특성 평가” 과제 의 일환으로 이루어졌으며, 이에 관계자들께 감사드립니다.

## 참고문헌

- (1) Kelsall, G.I. et al., "Low Emissions Combustor Development for Industrial Gas Turbine to Utilize LCV Fuel Gas," J. of Eng. for Gas Turbines & Power, Vol.116 (1994)
- (2) Cook, C.S. et al., "System Evaluation and LBTU Fuel Combustion Studies for IGCC Power Generation," J. of Eng. for Gas Turbines & Power, Vol.117 (1995)
- (3) Solar Turbines, "Gas Turbine Fuels" Turbomachinery Technology Seminar
- (4) 서제영, 이찬, "중발열량 대체연료 가스터빈 연소기의 설계를 위한 전산역학적 해석," 한국에너지공학회 춘계학술대회논문집 (2002)
- (5) 서제영, 중발열량 대체 가스연료를 사용하는 가스터빈 연소기의 수치해석적 연구, 수원대학교 대학원 기계공학과, 석사학위논문 (2003)
- (6) Westbrook, C.K. and Dryer, F.L., "Simplified Reaction Mechanisms for the Oxidation of Hydrocarbon Fuel in Flames," Combustion Science and Technology, Vol.27, 31-43 (1981)
- (7) Hautmann, D.J. et al., "A Multi-step Overall Kinetic Mechanism for the Oxidation of Hydrocarbons," Combustion Science and Technology, Vol.25, 219-235 (1981)
- (8) Lindstedt, R.P. and Selim, M.A., "Reduced Reaction Mechanism for Ammonia Oxidation in Premixed Laminar Flames," Combustion Science and Technology, Vol.99, 277-298 (1994)