

IGCC 가스터빈 연소기적용을 위한 석탄합성가스의 연소특성에 관한 연구

최병철, 김형택
아주대학교 에너지학과

Coal derived syngas combustion for a IGCC gas-turbine combustor

Byung-Chul Choi and Hyung-Taek Kim
Department of Energy studies, Ajou University, KOREA

1. 서론

IGCC 가스화기에서 생성된 석탄가스 주성분 중에 H_2 의 함량이 상대적으로 높은 관계로 매우 높은 화염속도 및 화학반응속도를 가진다 또한, 천연가스와 비교할 때 단열화염온도도 약 $200^\circ C$ 이상 높은 특성을 가진다. 이러한 석탄가스 연료의 특성으로 인해 석탄가스는 예혼합 상태에서 화염을 안정화시키기 어렵다. 특히 높은 화염전파속도로 인해, 연료와 공기가 예혼합영역에서 균일하게 혼합되기 전에 화염이 불규칙적으로 형성되게 된다. 이러한 현상은 화염의 불안정성 뿐 만 아니라 국부적인 화염온도의 증가를 가져오며, 그에 따라 환경오염물질 NO_x 의 발생량 증가도 수반된다. 최근 가스터빈 연소기는 화염온도를 낮추어 NO_x 발생을 줄이고자 예혼합 화염으로 가는 추세이며 따라서 CO 발생이 증가된다. 즉 NO_x 발생과 CO 발생은 서로 상반되므로 이를 해결하기 위하여 예혼합 후 국부적으로 완전 혼합이 이루어지게 하는 기술 등의 개발이 진행되고 있다. 본 연구에서 대상으로 하는 가스터빈연소기와 같은 연속류 연소기에 있어서 고부하/고효율 연소 및 유해 배가스 성분의 저감을 동시에 만족하는 연구결과를 얻기 위하여는 실제 연소기에서의 연소현상을 체계적으로 해석적으로 파악할 수 있는 연소기의 제작이 요구된다. 연소에 있어서 예혼합 공기나 연소용 공기에 선회류를 주었을 때 선회류의 주된 효과는 화염의 길이를 줄일 수 있고, 화염의 안정 연소범위를 넓힐 수 있다는 장점을 가지고 있어 많이 이용된다. 그러나 선회류를 동반하는 연소현상 해석은 대단히 복잡하기 때문에 선회확산화염을 형성할 수 있는 단순한 모델연소기를 제작하고 대상 석탄가스연료에 대한 화염특성을 파악하고자 한다. 위의 논의를 통하여 실험조건에 적합하다고 판단되는 실험실급 모델연소기에 대한 설계 파라미터를 도출하였다. 실험실급 연소기는 선회수를 조절하기 위하여 접선공기주입량 변경 방식을 택하였다. 설계 파라미터는 실제 석탄용량 3톤/일 가스화기에서 생성되는 석탄가스의 양을 약 $200Nm^3/hr$ 라 가정하여 각 연소기의 용량을 결정하였다. 실험실용 모델 연소기는 연료량을 10 l/min의 용량으로 설정하였다.

2. 실험실급 모델 연소기

버너는 축방향 공기 공간(plenum), 선회모듈, 공기 수축관(contraction), quarl, 그리고 연료주입관의 다섯 가지 구성요소로 되어있다. 모든 구성요소들은 흡이 나있고 설치나 연구를 위한 다른 형태로 변경할 수 있다. 선회모듈은 연속적으로 다양한 선회를 주기 위하여,

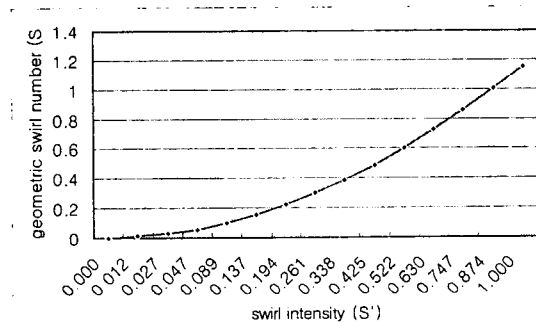
축방향과 접선방향 공기 주입구로 구성된 연소공기 주입 시스템으로 설계하였다. 따라서, 축방향 공기 또는 선회 방향 공기비를 조절함으로써, 선회강도를 변화시킬 수 있다. 선회는 연소공기 환형 주입구에 대하여 접선방향과 축방향 주입공기의 흐름에 의해서 결정된다. 이러한 배열에 의하여 선회공기와 축방향 공기비의 변화에 따라서 선회의 강도가 결정된다. 선회공기는 상부에 볼 때 시계방향으로 회전하게 된다. 선회강도 (S')는 전체 연소공기 유량을 선회공기유량으로 나뉜 값을 제공한 값으로 표현된 식(1)과 같다.

$$S' = \left(\frac{m_{\phi}}{m_a + m_{\phi}} \right)^2 \quad (1)$$

이러한 정의는 Feikema등이 정의한 식(2)의 기하학적 선회수와 비슷한 정의이다.

$$S_g = \frac{\pi \cdot \gamma_o \cdot d_a}{2A_t} \left(\frac{m_{\phi}}{m_a + m_{\phi}} \right)^2 \quad (2)$$

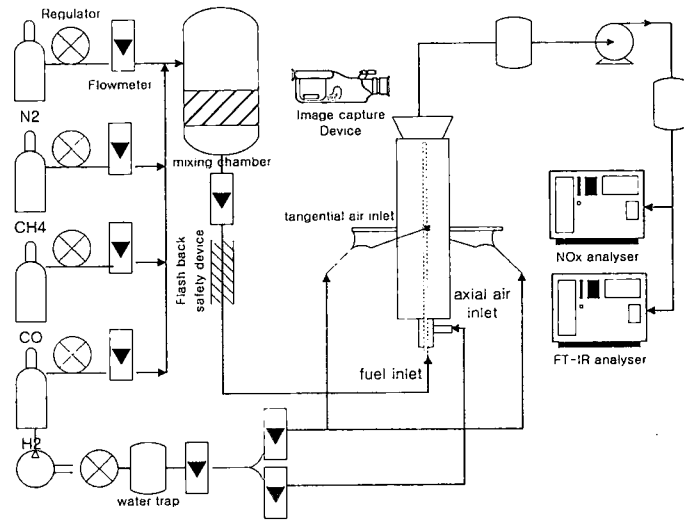
여기서 r_o 는 접선방향 선회주입구의 반지름, d_a 는 트로틀 직경, A_t 는 접선방향 선회주입구의 전체면적, m_a 는 축방향 공기질량유속, 그리고 m_{ϕ} 는 접선방향 공기질량유속을 나타낸다. 위의 식을 이용하여 주입 석탄가스의 유량을 10 l/min으로 가정하였을 때의 선회강도를 계산하였다. 계산 결과는 아래의 [그림 1]과 같다.



[그림 1] 선회강도(S')에 따른 기하학적 선회수(S_g)

연료분사 노즐의 여섯 가지 형태는 크게 축방향과 접선방향 다중 홀 제트 분사의 형태로 결정하였다. 설계 파라미터는 당량비 1에서 주입연료의 노즐에서의 선속도와 주입공기의 선속도가 각각 115m/sec와 20m/sec가 될 수 있도록 결정하였다. 연소시스템의 구성은 실험실급 석탄가스 연소 시스템은 석탄합성가스의 조성을 모사하기 위해서 석탄가스의 주성분인 CO, H₂, CH₄, N₂등의 순수가스를 혼합할 수 있는 장치로 구성하였다. 산화제인 공기의 공급은 공기 압축기로 구성하였다. 각각의 가스의 압력조절은 압력조절기를 이용하여 조절하고 유량은 공기유량계를 사용하여 구성하였다. 아래의 [그림 2]는 본 실험장치의 구성 계통도이다. 구성도를 살펴보면 석탄합성가스의 주성분인 CO, H₂, CH₄, N₂등의 순수가스를 유량계를 조절하여 혼합챔버를 거치면서 혼합하여 주입되는 연료가스의 유량을 최종적으로 조절하는 유량계를 거쳐서 연료노즐을 통하여 축방향 및 접선방향 주입노즐을 통하여 연소기에 주입되도록 설계하였다. 산화제인 공기의 경우는 공기압축기를 통해 압축된 공기를 1,2차 유량계와 공기중의 수분제거를 위해서 실리카겔로 충전된 충전재를 통하여 원하는 선회강도에 따라 주입공기의 유량을 결정하여 연소기에 주입되도록 설계하였다. 연소과정을 통해서 생성

된 화염의 형상은 디지털 카메라를 통해 촬영하고 화염의 온도를 측정할수 있도록 R-Type 열전대 온도계를 DAWIN 100 Data Aquisition unit를 컴퓨터에 연결하여 온도 데이터를 수집하도록 설계하였다. 또한 반응후 배가스는 수분제거 trap를 거쳐서 진공펌프로 샘플링하여 분석시스템으로 보내어지게 설계하였다. 배가스내의 CO₂, CO의 조성은 Perkin Elmer사의 Paragon 1000 FT-IR을 사용하여 측정하도록 하였으며 NO_x의 조성은 Signal사의 NO_x Analyser 4000 series를 사용하여 측정하도록 설계하였다.



[그림 2] 석탄합성가스 연소시스템 구성도

석탄가스 연소시스템에 사용된 유량계는 공기를 기준으로 유량이 결정되었다. 따라서 주입되는 연료가스의 성분에 따른 유량계의 보정 실험을 실시하였다. 유량계 보정 실험은 가스 유량보정장치(Wet-gas meter)를 사용하여 공기유량계의 눈금과 성분가스별 실제유량을 보정하였다. 보정 결과를 살펴보면 수소의 경우 분당 20L를 주입하기 위해서는 실제 유량계에서는 약 5L의 눈금에서 유량을 결정하여야 함을 알 수 있다. 또한 CO의 경우는 적은 유량에서는 유량계의 눈금과 큰 차이를 보이지 않았으나 유량이 증가함에 따라 유량계의 눈금보다 적은 유량이 주입됨을 확인할 수 있었다.

3. CO/H₂ 합성가스 연소실험

중류화산화염과는 달리 난류화산화염에서는 화학반응보다는 확산속도가 빠르게 일어나므로, 난류화산화염의 안정화 및 유동특성을 규명하기 위해서는 연료와 공기의 반응을 화학반응과 공기 역학적 반응으로 구분하여야 한다. 따라서 연료 공기비율로 당량비와 운동량비를 정의하여 사용하였다. 본 실험에 사용된 연료는 CO, H₂이며 온도는 상온 조건이며 공급압력은 실험조건에 따라 조절하였다. 표준상태(25℃, 대기압)에서 CO/H₂와 공기의 반응을 살펴보면 이론산소량(O_o)/0.21 = 0.5/0.21(H₂ + CO) = 이론공기량(A_o) = 2.38(H₂ + CO) [Nm³/Nm³]으로 나타낼 수 있으며 공기가 산소 21%, 질소 29%의 부피비로 이루어져 있다고 가정하면, 즉 산소 1몰에 대해서 질소 3.76몰이 공기를 구성하는 것이다. 따라서 이론반응 공연비(Stoichiometric air-fuel ratio)는 다음과 같이 구할 수 있다.

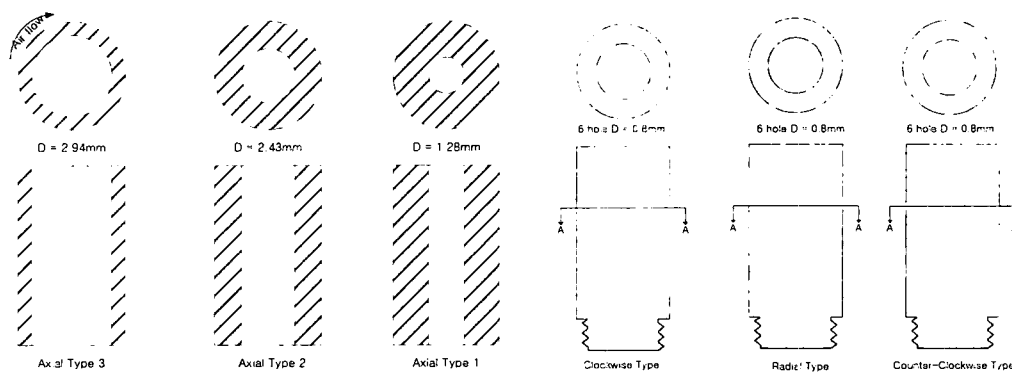
$$(A/F)_{\text{stoi}} = (m_{\text{air}}/m_{\text{fuel}})_{\text{stoi}} = 4.76a/1(MW_{\text{air}}/MW_{\text{fuel}})$$

a : 산소반응몰수.

당량비(Equivalence ratio) ϕ 는

$$\phi = (A/F)_{\text{stoi}} / (A/F)_{\text{act}} = (A/F)_{\text{act}} / (A/F)_{\text{stoi}} = 1 / \lambda$$

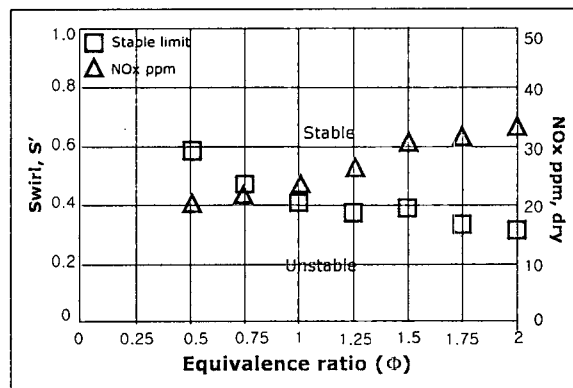
선회도는 설정된 유량들에 대하여 식 (1)과 식 (2)를 통하여 구하였다. 연료주입 노즐의 형태는 문헌조사를 통하여 축방향 및 접선방향 주입형태로 결정하였다. 실험에 사용된 노즐의 형상은 노즐의 직경의 차이에 의한 주입속도가 차이가 나는 축방향 주입노즐과 제트류로 연료를 주입하는 접선방향주입노즐은 접선방향 주입노즐, 주입공기 선회의 방향과 일치하는 CW(Clockwise)노즐, 그리고 선회과 반대방향인 CCW(Counter-Clockwise)노즐로 제작 실험에 사용하였다. 형상은 [그림 3]에 보였다



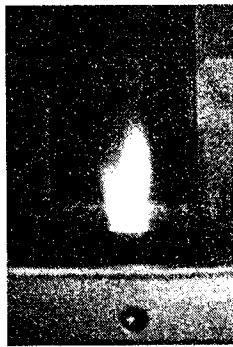
[그림 3] 연료주입속도에 따른 축방향 및 접선방향 연료주입노즐

4. CO/H₂의 조성비에 따른 화염안정화 영역

CO, H₂ 합성가스의 조성비에 따른 화염안정화 영역에 대한 연소시험을 수행하였다. 실험조건은 CO, H₂합성가스 부피비와 당량비를 변화시켜가면서 화염안정화 영역과 이때 생성되는 NO_x의 생성량을 분석하였다. 노즐의 형태는 축방향 연료주입형태의 Type 1의 형태를 사용하였다. [그림 4]는 CO:H₂ 혼합비가 1:1인 경우의 결과를 나타내었다. 또한 당량비 1.25에서 선회수 1.0과 0.4에서의 화염의 형태에 대해서는 [그림 5]에 나타내었다.



[그림 4] CO와 H₂ 합성가스연료비와 당량비에 따른 화염안정화 영역과 NO_x 생성량 (1:1)



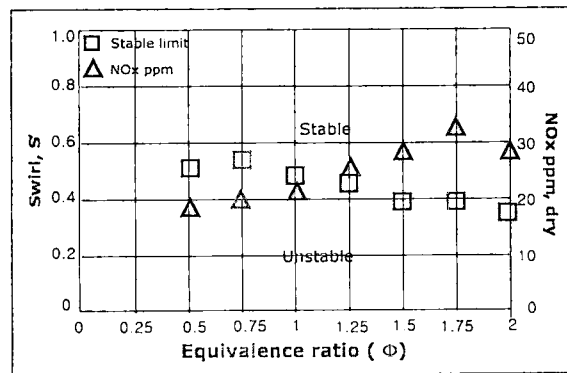
$S' = 1.0$



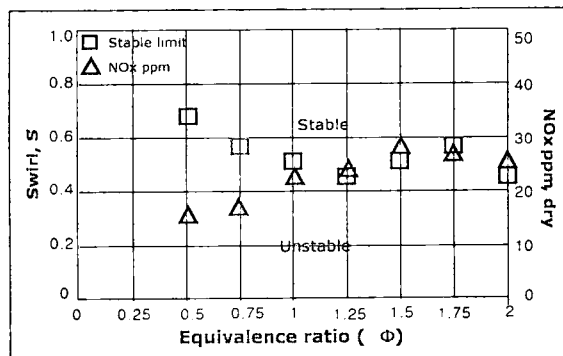
$S' = 0.4$

[그림 5] 당량비 1.25에서 선회수에 따른 축방향 노즐의 화염의 형상 (1:1)

[그림 6]과 [그림 7]은 CO:H₂ 혼합비를 변화시켰을 때의 화염안정화 영역에 대한 연소 시험의 결과이다. [그림 6]은 CO:H₂가 1.5:1인 경우의 결과이고 [그림 7]은 CO:H₂비가 2:1인 경우의 결과를 나타내었다. [그림 6]에서는 화염안정화 영역이 당량비의 변화에 따라서 크게 변화가 없는 것을 확인할 수 있다. 선회강도의 변화에 대해서는 선회수 0.4이상의 영역에서 화염이 안정화되는 것을 확인할 수 있었다. NO_x의 생성량은 당량비가 증가함에 따라서 NO_x의 생성량도 증가하는 경향을 보이는 것으로 판단되었다. [그림 7]에서는 화염안정화 영역이 당량비의 변화에 대해서 당량비 1에서 1.25의 영역에서 넓은 영역의 안정화 영역을 형성하는 것을 확인할 수 있었고 선회강도에 대해서는 당량비 1이하의 영역에서는 강선회 영역에서 화염이 안정화되는 것을 확인할 수 있었다. NO_x의 생성량은 당량비 영역 1.5 이상에서 NO_x의 생성량이 증가하는 것을 확인할 수 있었다.



[그림 6] CO와 H₂ 합성가스연료비와 당량비에 따른 화염안정화 영역과 NO_x 생성량 (1.5:1)



[그림 7] CO와 H₂ 합성가스연료비와 당량비에 따른 화염안정화 영역과 NO_x 생성량 (2:1)

5. 결론

위의 결과에 의하면 CO의 농도가 증가시 화염의 길이가 길어지며, 또한 화염안정화 영역이 감소함을 확인할 수 있었다. 당량비를 고려하여 보면 당량비가 증가함에 따라 NO_x의 배출이 증가함을 확인할 수 있었다. 또한 당량비 1.25에서 2.0의 영역에서는 화염안정화영역의 차이가 없는 것을 확인할 수 있었다. 선회수를 고려한다면, 선회수가 증가함에 따라 화염의 길이가 감소함을 확인할 수 있었다.

6. 참고문헌

- (1) Matt Mikio Miyasato : "The Influence of Fuel and Air Mixing on NO_x Production in a Model Natural Gas Burner", Thesis, University of California Irvine, (1993)
- (2) 김용철 : "저발열량 석탄가스연료의 연소특성에 관한 실험적 연구", 논문, 수원대학교, (1999)
- (3) Stephen R. Turns : "An Introduction to Combustion", McGraw-Hill Book, (1996)
- (4) J. M. Beer and N. A. Chigier : "Combustion Aerodynamics", Robert E. Krieger Publishing Company, (1983)
- (5) A. K. Gupta, D. G. Lilley, and N. Syred : "Swirl Flows", Abacus Press, (1984)