

70,000 kcal/hr 파이로트급 석탄가스 연소기 설계에 관한 연구

최병철, 김형택
아주대학교 에너지학과

The Study of 70,000 kcal/hr Pilot Scale Coal Synthetic Gas Combustor Design

Byung-Chul Choi, Hyung-Taek Kim
Dept. of Energy Studies, Ajou University

1. 서론

가스터빈은 경량, 고효율이고 설치규모가 작고 시동시간이 짧으며 냉각수가 불필요하고 시설 및 유지가 용이하며 설치장소에 제약이 없는 등의 장점으로 항공기 엔진으로서 뿐만 아니라 발전용, 동력용 등 산업용 엔진에도 널리 사용되었고, 선진 여러나라에서는 새로운 엔진의 설계와 기존 엔진의 개선을 위해 많은 연구가 수행되고 있다. 가스터빈 연소기를 설계할 때는 높은 열효율, 저연료 소비율, 높은 연소효율, 점화의 신뢰성 및 안정성, 넓은 안정한계, 작은 압력손실, 연소실 출구의 적절한 온도분포, 저 공해 물질 배출 및 저소음, 적절한 크기 및 모양, 내구성과 다양한 연료 사용 가능성 등 기본적인 요구조건들을 만족시키기 위해 주요 성능 인자를 파악하고 요구조건을 정확하게 이해하여야 하며 서로 상충되는 조건들을 잘 조합하여 최적화 시켜야 한다. 설계에 적용시킬 IGCC 가스화기에서 생성된 석탄가스는 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. 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 파악할 수 있는 연소기의 제작이 요구된다. 연소에 있어서 예혼합 공기나 연소용 공기에 선회를 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 연소기를 디자인 하고자 한다. 본 연구에서는 가스터빈 엔진의 연소실 설계 제작과 관련하여 Pratt & Whitney 사의 JT9D의 실제 항공기용 엔진을 기본으로 단순화한 파이로트급 연소기를 설계하는 과정을 제시하고자 한다.

2. 방법론

설계 기준으로 결정한 Pratt & Whitney 사의 JT9D 엔진은 압축비와 바이패스비가 큰 2-스플 축류 터보팬 엔진으로서 15단 압축기, 환형 연소실, 및 6단 터빈으로 구성되어 있다. JT9D 엔진의 전형적인 크기는 길이가 128인치, 최대직경이 95.56 인치이다.¹⁾ 엔진의 구성품 중 연소부분을 살펴보면, 디퓨저 섹션은 후압축기에서 나오는 공기유동을 직선화하거나 연

소실 입구에서 적절한 속도를 갖도록 유동을 확대시키는 역할을 한다. 연소 섹션에서는 연료가 공기와 적정 비율로 혼합되어 연소됨으로써 엔진을 통해 흐르는 공기에 에너지를 부가하게 된다. 실제 엔진에서 주연소지역에 들어오는 1차제트의 공기구멍이 지름 34.5인치 원주상에 위치하고 연소기에 장치된 선회기가 총 20개이므로 선회기 1개에 해당하는 연소영역을 가정하여 연소기를 설계하고자 하였다. 석탄 합성가스조성이 CO:H₂비 (2:1, N₂ free base)일 때, 발열량은 2000 kcal/Nm³의 값을 갖는다고 알려져 있다²⁾. 최병철³⁾⁻⁴⁾등의 연구에서 제시한 석탄합성가스의 화염안정화 영역에 준하는 연소기에 주입되는 연료의 발열량 수준을 약 70,000 kcal/hr로 설정할 때, 이론 당량비에 준하는 공기량을 계산하였으며 계산된 공기량을 기준으로 연소기를 설계하였다. 본 장치는 환형 연소실의 상압유동 특성을 살펴보기 위한 장치로서 실제 가스터빈의 기하학적 형상과 유사하도록 연소실은 4각형 형태(Rectangular Enclosure)로 결정하였다. 결정된 연료량이 이론당량비 조건에서 화염안정화 영역을 갖는 연료유속에 맞추어 연료노즐을 설계하였고 이때 주입되는 산화제인 공기의 유속에 맞추어 환형의 공기주입구를 디자인하였다. 실험조건을 상온(300 K), 상압(1.01325 × 10⁵ Pa)이라 할 때, 주입되는 공기의 밀도값은 1.1719 kg/m³로 결정하였다.

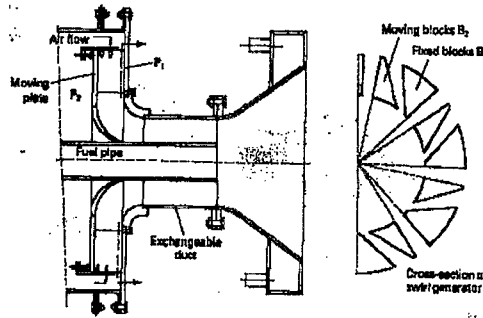
3. 연료노즐 선정

주연소 지역으로 공급되는 공기량과 이론 당량비를 이루는 석탄합성가스의 유량은 7.9*10⁻³ kg/s이고 1기압 25℃에서의 체적유량은 598 l/min이다. 실험실급 접선공기량 변경방식 연소기를 이용한 석탄합성가스의 조성, 발열량 수준, 노즐의 형상, 선회수에 따른 화염안정화 영역에 대한 실험결과를 이용하여 노즐을 디자인하였다. 디자인된 연료유량에 따른 발열량은 71760.39 Kcal/hr로 JT9D 연소기에서 같은 공기량에서 소비되는 프로판의 소비량인 7.12*10⁻³kg/s 보다 약 11배 많고 발열량은 약 2배 정도 크게 설정되었다. 축방향 연료 노즐의 형태는, 2000Kcal/hr의 발열량범위에서 가장 넓은 화염안정영역을 보인 축방향 노즐 type1을 선정하였으며, 이때 노즐의 bulk velocity가 이론당량비 영역에서 약 20m/sec였으므로 동일한 bulk velocity를 갖는 노즐의 직경을 구하였을 때, 약 22mm의 직경을 가져야 하였다. 접선방향 노즐의 경우 모든형태의 노즐에 대하여 3000kcal/hr의 영역에서는 화염안정화 영역에 있었다. 마찬가지로 접선방향 형태의 노즐 직경을 구하였을 때 연료구(fuel inlet hole)을 6개 뚫었을 경우와 8개 뚫었을 경우에 6개의 연료구인 경우 약 4.8mm, 8개의 연료구인 경우 약 4.2mm의 직경을 가져야 하였다. 축방향 연료노즐의 경우 모든 공기량은 환형의 공기주입구로 공급되고 선회가 없을 경우의 화염길이를 구하여보았다. Delichatsios⁴⁾의 연구에서 제안된 Froude수와 연관된 화염길이를 계산한 결과 디자인된 축방향 노즐의 경우 약 1.4m의 화염길이를 가질것으로 나타났다. 접선방향 연료노즐의 경우 실험실급 노즐과 마찬가지로 Tangential 방향, Clockwise방향, Counter-Clockwise방향의 노즐을 제작하고자 한다. 제트구멍을 축방향에 일치하게 하여 실험실급에서 실험하였을 경우 화염이 디퓨저에 부딪혀 열충격을 야기시키는 결과를 가져서 축방향 45°를 이루도록 연료구를 뚫으려 한다. 연료에 대한 공기의 환형주입구의 직경은 공기 유속이 22.9 m/sec를 가지도록 47mm로 선정하였다. Conical형태의 디퓨저의 경우 노즐영역의 직경과 디퓨저 길이의 비가 1~2 영역에서는 약 5°정도의 각을 갖도록 설계하였다.⁵⁾

4. 선회기 설계

실용화된 가스터빈에서는 주 연소지역을 들어가기 직전에 노즐 주위에 베인을 설치하여 접선방향의 속도성분을 만들어 준다. 하지만 실험연구에서는 선회수를 조절하며 다양한 조건을 시험해야 하므로 가변블럭(moving block)형태의 선회발생기를 선정하였다. 가변 블럭 선

회발생기는 두 개의 원뿔형 판에 블럭들이 붙어 있어서 반경방향 유동로와 접선방향 유동로를 번갈아 형성한다. [그림 1]과 같이 P2판을 회전시키고 P1 판을 고정시켜 돌음으로써 반경방향 유동로와 접선방향 유동로를 변화시키고 선회강도를 연속적으로 조절할 수 있게 된다. 이 장치의 장점은 버너가 작동하고 있는 중에 선회강도를 변화시킬 수 있고 선회를 생성하는 데 비교적 낮은 공기 압력이 필요하며 높은 선회수를 얻을수 있다는 점이다.



[그림 1] 블록변경방식 선회기

선회 연소기의 설계 파라미터와 식(1)과 (2)의 각방향 모멘텀 플릭스로 표현되는 계수값인 σ 값을 이용하여 가변블록의 각도 변화에 따라서 선회수(S)를 계산한다.

$$\sigma = \frac{2\pi}{z\xi_m} \sin \alpha \frac{\cos \alpha \left[1 + \tan \alpha \tan \left(\frac{\xi}{2} \right) \right] \left(\frac{\xi}{\xi_m} \right)}{\left\{ 1 - \left[1 - \cos \alpha \left(1 + \tan \alpha \tan \left(\frac{\xi}{2} \right) \right) \right] \frac{\xi}{\xi_m} \right\}} \quad (1)$$

$$S' = \frac{G_\theta}{G_x} = \sigma \frac{R}{2B} \left[1 - \left(\frac{R_h}{R} \right)^2 \right] \quad (2)$$

선회수 S'은 선회기의 상사인수로 쓰일 수 있으므로 기존 선회기의 크기로부터 블록 선회기의 크기를 결정한다. 기존의 기하학적 형상조건인 α , ξ_m , Z값을 같은 값으로 취하고 실험장치의 연소실 크기에 맞추도록 R_h 는 15mm, R은 23.5mm로 정하면, σ 값은 $0 < \sigma < 4$ 범위에 있으므로 $R/B=1.23$, $R_h/R=0.563$ 인 기존의 가변 블록 선회기의 선회수가 $0 < S < 1.4$ 범위에 있으므로 실험장치의 선회수를 같은 범위에 있게 하기 위한 블록의 폭을 식을 이용하여 구하고 모든 디자인 값을 살펴보면, $\alpha = 50$, $(\xi_m) = 12$, $Z = 8$, $R_h = 15$, $R = 23.5$, $R_1 = 50.7$, $R_2 = 81.2$ mm, 그리고 $B = 16.6$ mm의 값을 갖는다.⁶⁾

5. 연소실 설계

선회기를 통과하는 공기와 라이너와 케이싱사이의 애놀리스를 통과하는 공기유동이 실제 가스터빈과는 다르게 별도로 전체 유량에 의한 케이싱 단면적 결정은 무의미해진다. 따라서 설계 기준인 JT9D 연소기의 기하학적 형상만을 축적계수를 이용하여 사용하였다. 연소실의 너비는 일반적으로 연료 및 공기주입구의 직경의 1~1.2배 정도로 결정한다.⁷⁾ 따라서 120mm로 결정하였으며 이때 JT9D연소기 선회기당 평균폭은 130 mm로 설계에 사용되는 축적계수는 0.923이다. 가스터빈 연소기의 연소실 너비는 크게 주연소지역(primary zone,

l_{pr}), 중간지역(secondary zone, l_{sc}), 그리고 희석지역(dilution zone, l_{db})으로 구성된다. 주연소 지역은 연소가스의 재순환 및 혼합을 위한 길이에 약간의 여유길이 필요하다고 알려져 있다. 일반적으로 라이너의 직경 또는 높리와 비슷하게 120mm로 결정하였으며, 중간지역은 혼합을 위한 길이에 2차연소를 위한 길이를 더한 크기로 라이너 직경인 H의 0.7의 값인 84 mm로 결정하였다. 희석지역의 길이는 터빈 입구의 온도조건 맞추기 위한 충분한 혼합이 가능하도록 라이너 직경의 1.5배인 180mm로 결정하였다. 최종적으로 전체길이는 약 384 mm로 결정하였으며, 이 값은 실제 버너의 라이너 직경과 연소실길이의 비인 2~4영역내에 있는 것을 확인할 수 있었다. 1차 제트 공기공의 위치는 주연소지역의 크기가 120mm이며, 재순환 영역은 주연소지역의 크기보다 작아야 한다. 1차 제트가 중심면이 도달하는 지점까지를 재순환 영역의 최대크기라고 할 때, 제트의 초기 유입각이 78.5 °이므로 1차 제트는 공기공의 위치보다 8.1mm 이상의 후류지점에서 중심면에 도달한다. 이것을 고려하면 1차 제트 공기공은 연소실 앞에서부터 65mm 지점에 위치시킨다. 중간지역의 공기공의 위치를 중간지역 크기의 2/3 되는 지점에 위치 시켜서 주연소 지역에서 불완전 연소가스가 완전연소할 수 있도록 여유 길이를 주고 새로운 공기를 혼합시키면서 부분적인 희석이 이루어 지도록 한다. 따라서 중간지역 공기공의 위치는 175 mm로 한다. 희석지역의 공기공의 위치는 희석공기가 라이너의 냉각과 연소가스가 희석이라는 두 역할을 하게되므로 공기공을 희석지역에 골고루 분포시킨다. 희석지역이 204~384 mm 지역이므로 204, 239, 274, 309, 그리고 344 mm지점에 한 열 씩 위치되도록 설계하였다. 주입 공기의 유량분포형태는 주연소지역과 중간지역에 이론당량비에 해당하는 공기를 주입하고하며, 희석지역의 주입공기유량은 1500℃ 급 가스터빈의 주입조건을 만족시키기 위한 공기량으로 주연소 지역을 75%(선회기 유량 50% 그리고 1차 제트유량 25%), 중간지역25%, 그리고 희석지역을 100%로 디자인하였다. 주연소지역과 중간지역의 공기분포는 I. Wierzbaw와 V. Kilchyk의 연구에서 제시한 화염의 Flammability limit을 고려하여 결정하였다.⁸⁾

6. 라이너 공기공 설계

라이너 벽을 통과하는 유동에서 제트유동은 방출계수(Discharge Coefficient)인 식(3)을 이용하여 구하였다.⁹⁾

$$C_D = \frac{1.25(K-1)}{[4K^2 - K(2-\alpha)^2]^{0.5}} \quad (3)$$

실제 가스터빈을 모사하기 위해서 상,하 라이너에서만 공기를 주입하기 위하여 홀을 상하에 설치하여야 하나, 사각형 연소기 형태로 실제 디자인할 경우 각 면에 3개씩 12개로 산정하였다. 전체주입되는 유량과 1차 제트 영역의 공기구당 유량을 계산하여 그 값으로부터 α 값을 구하여 최종적으로는 뉴튼방법을 이용하여 K값을 구하였다. 제트의 동압을 애놀러스의 동압으로 나누워준 K값으로부터 1차 제트의 속도, V_{jp} 와 제트의 지름, d_{jp} 를 구하여 최종적으로 공기구의 직경을 8.3 mm로 결정하였으며, 제트의 침투깊이, Y_{max} 는 모멘텀 플럭스 비, J와 질량분율을 이용하여 계산하여 주입되는 공기의 제트가 충분히 중심선까지 침투할 것으로 판단하였다. 중간지역의 공기공의 크기는 1차 제트 공기공의 면적과 같게하고 상하 라이너에 3개의 공기공 설정하여 최종 공기구의 직경은 8.3 mm로 디자인하였다. 희석 공기공은 최대한의 혼합 효과를 위해 5열로 제작하고자 하며 1열에 대한 계산값을 나머지 열의 공기공에 대해서도 적용하고자 한다. 희석공기구의 목적은 혼합에 의한 연소효율을 증진이 아니

- 2) Bench Scale급 건식 석탄가스화기 운전 및 모사기술 개발(II), 산업자원부, pp.16-72, 1999
- 3) A study of Diffusion Flame Length on Low Calorific Value(LCV) Coal Gas, Theories and Applications of Chem. Eng., 2001, Vol 7, No.2 4635
- 4) IGCC 가스터빈 연소기적용을 위한 석탄합성가스의 연소특성에 관한 연구, 한국에너지공학회, 춘계학술발표회논문집, p21, 2001
- 5) Arthur H. Lefebvre, "Gas Turbine Combustion", Taylor & Francis, pp.72-131, 1998
- 6) J. M, Beer and N. A. Chigier, "Combustion Aerodynamics", Robert E. Krieger publishing company, pp107-115, 1983
- 7) Gas turbine combustion short course, march 6, Fuel Injector Design ; gaseous fuel, Ken Smith, Irvine Ca. USA, 2000
- 8) I. Wierzba and V. Kilchyk, "Flammability Limits of Hydrogen-carbon monoxide mixtures at moderately elevated temperature", International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 26, pp.639-643, 2001