

바이오 가스터빈 연소기의 비반응장과 반응장의 3차원 유동해석

안윤호* · 남삼식* · 최진훈* · 임지혁* · 김호근* · 전재철*

CFD Simulation of Non-reacting and Reacting Flows for a Gas Turbine Combustor Firing Biogas

Yunho An* · Samsik Nam* · Jinhoon Choe* · Jihyuk Im* ·
Hokeun Kim* · Jaechul Chun*

ABSTRACT

Doosan Heavy Industries & Construction Co., Ltd. has been recently developing the gas turbine engine using the biogas as fuel. This paper describes the non-reacting and reacting flow analysis of the combustor which is one of the main components in gas turbine engine. Through CFD analysis, investigation has been performed to evaluate the primary factors for aerodynamic design and to predict combustor behaviors during operation with various fuel distribution ratios. The calculation results are compared with rig test data, which reveals that CFD predictions such as pressure loss, air distribution ratio, and recirculation flow are quite reliable. The trend of NO formation was similar with the test, except the low fuel distribution ratio.

초 록

최근 두산중공업은 바이오가스를 연료로 사용하는 가스터빈엔진을 개발하고 있다. 본 논문은 바이오 가스터빈엔진의 주요 구성품 중 하나인 연소기의 비반응장과 반응장 해석에 대한 것이다. 해석을 통해 연소기 설계 결과를 검증하고 다양한 Fuel Distribution Ratio에서의 연소기 작동 거동을 예측하였다. 해석 결과는 두산에서 자체 수행한 리그 시험 결과와 비교하였다. 해석 결과 연소기 압력 손실, 공기 분배비, 재순환 유동의 예측은 신뢰할 만한 수준이며, 낮은 Fuel Distribution Ratio 영역에서의 NO_x 생성 추세는 다소 불일치하였다.

Key Words: Gas Turbine Engine(가스터빈엔진), DLN Combustor(DLN 연소기), Biogas(바이오가스), CFD Analysis(CFD 해석), Non-reacting/reacting Simulation(비반응장/반응장 해석)

1. 서 론

* 두산중공업 기술연구원

† 교신저자, E-mail: yunho.an@doosan.com

1.1 개요

최근 가스터빈엔진 개발 및 업그레이드에서 연소기는 매우 중요한 역할을 하고 있다. 과거 연소기 개발 방향은 화염 안정화 및 성능 향상에 초점이 맞추어져 있었다. 그 후, 전 세계적으로 환경 규제가 강화됨에 따라 NOx, SOx 등과 같은 오염물질 배출의 최소화를 위한 기술 개발이 주요 방향이었고, 최근에는 바이오 연료 사용 등과 같이 친환경적인 기술 개발에 초점이 맞추어지고 있다.

두산중공업은 천연가스를 연료로 사용하는 5MW급 소형 가스터빈 엔진을 2005년부터 개발하여 현재 완성 단계에 있다. 이 엔진은 2012년에 김포 수도권 매립지에 설치되어 실증 시험을 할 예정이다. 매립지에서는 음식물 쓰레기로부터 바이오가스가 발생하기 때문에 이를 연료로 사용하는 방안이 검토되었다. 따라서 실증 부지에 설치될 두산의 가스터빈 엔진은 연소기의 설계를 변경하여 바이오가스를 연료로 사용할 수 있도록 하였다.

본 연구는 바이오 가스터빈 연소기의 비반응장과 반응장 해석에 대한 내용이다. 비반응장 해석을 통해 설계된 연소기의 주요 설계점들을 점검하고, 반응장 해석을 통해 연료 분배 조건에 따른 연소기 유동장 및 온도장의 변화와 NOx 배출량의 경향성을 예측하였다.

1.2 두산의 바이오 가스터빈 연소기

본 연소기는 천연가스용 가스터빈엔진 연소기를 메탄과 이산화탄소가 주성분인 바이오가스를 주 연료로 사용하도록 설계 변경한 연소기이다. 총 8개의 연소기가 하나의 세트를 이루고 있는데, 각각의 연소기 캔은 케이싱을 공동으로 사용하는 캔-애놀러(Can-annular) 타입의 연소기이면서 NOx 배출량을 최소화 하기 위해 Dry Low NOx (DLN) 연소 방식을 사용하는 DLN 연소기이다. DLN 연소기는 화염 온도가 낮아지면 NOx 생성량도 낮아지는 특성에 착안하여 화염의 온도를 낮추기 위해 낮은 당량비에서 희박연소를 이용하여 작동하는 연소기를 말한다[1].

연소기는 크게 버너헤드, 라이너, 트랜지션피스로 구분된다. 버너헤드는 연료와 공기를 균일하게 혼합시키는 역할을 하고, 라이너는 연소가

일어나는 장소를 제공하며, 연소 가스는 트랜지션피스를 거쳐 터빈으로 유입된다. 특히, 본 연소기의 버너헤드는 파일럿과 메인의 2단 반경류(Radial) 스윌러 구조로 설계되었다. 파일럿 스윌러는 상대적으로 과농 연소를 통해 화염의 안정성을 높이는 역할을 하고, 메인 스윌러는 희박연소를 통해 연소기의 성능 및 배기가스 수준을 조절하는 역할을 한다[2].

2. 수치해석 방법

2.1 해석 형상 정의 및 격자 생성

Figure 1은 본 연구에 사용된 해석 형상 및 격자이다. 각각의 연소기는 엔진 축을 중심으로 주기성을 띄고 있기 때문에 해석영역은 연소기 세트의 1/8 영역으로 제한하였다. 격자는 연소기 내부와 외부 영역으로 구분하여 생성하였고, 각각은 버너헤드의 스윌러 입구, 라이너와 트랜지션피스의 냉각 공기구멍 입구, 희석 공기구멍 입구에서 연결되어 있다. 이와 같은 방법으로 격자 생성을 한 이유는 공기분배비를 예측하기 위함이다. 이외에 해석의 효율성을 높이기 위해 터빈 블레이드로 연결되는 냉각공기 유로 및 케이싱의 요철 등 불필요한 형상들은 단순화하였다[3].

격자 생성은 상용 프로그램인 ICEM CFD를 이용하였다. 격자 의존성 검사 및 격자 타입에 관한 선행 연구를 통해 격자는 Tetrahedral 타입을 선정하였고, 해석을 위해 약 9,800,000개의 격자와 약 2,060,000개의 노드를 사용하였다.

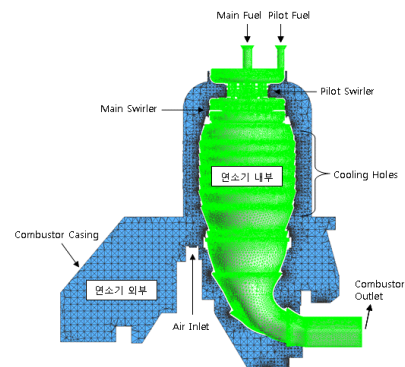


Fig. 1 Geometry and Mesh for CFD Analysis

2.2 수치해석 모델 및 경계조건

수치해석은 상용 코드인 ANSYS CFX를 이용하였다[4]. 비반응장과 반응장 해석에 대해 난류 모델은 k-ε 모델을 사용하였고, 반응장 해석의 경우 연소 모델은 Eddy Dissipation Model (EDM)과 Finite Rate Chemistry (FRC) 모델을 혼합하여 사용하였다. 화학반응모델은 Methane Air WD2 NO PDF 모델을 사용하였고, NOx 생성 모델은 Thermal NO PDF, Prompt NO Methane PDF 모델을 적용하였다.

경계 조건의 위치는 Fig. 1에서 참고할 수 있다. Inlet 조건의 위치는 'Air Inlet', 'Pilot Fuel', 'Main Fuel'이고, Outlet 조건의 위치는 'Combustor Outlet'이다. 비반응장 해석의 경계 조건은 표준 설계 조건인 Table 1의 'Case 2'를 적용하였다. 반면, 반응장 해석의 경우 Table 1과 같이 Fuel Distribution Ratio의 변화에 따른 총 4 케이스의 해석을 통해 연소기 유동장 및 NOx 배출량 추세를 예측하였다.

3. 해석결과 및 고찰

3.1 비반응장 해석

비반응장 해석을 통해 압력손실과 공기분배비를 계산하고 유동장의 적정성을 예측하였다[5]. 성능해석 결과 엔진이 목표하는 효율을 달성하

기 위해서는 연소기의 압력 손실이 6.94% 이하 여야 하는데, 해석 결과 약 6.3%의 압력 손실이 예측되었다. 공기분배비는 연소기 설계에서 가장 중요한 인자 중 하나이다. 연소기로 유입된 공기는 버너헤드, 라이너와 트랜지션피스의 냉각 구멍, 희석 공기구멍으로 목표한 비율로 분배되어야 한다. 이를 통해 연소기 성능을 만족시키면서 화염을 안정적으로 유지할 수 있고, 라이너와 트랜지션피스의 냉각효과를 높일 수 있으며, 연소기 출구에서 요구되는 온도 조건을 만족시킬 수 있기 때문이다. 공기분배비는 크게 파일릿 공기, 메인 공기, 희석 공기, 냉각 공기로 구분하여 비교한다. 해석과 리그 시험값을 비교한 결과, 최대 오차는 메인 공기에서 약 0.6%로 해석이 실제 공기분배비를 상당히 정확하게 예측하였다.

한 편, 화염은 소멸되지 않고 원하는 위치에 안정적으로 존재해야 한다. 이를 위해 본 연소기는 화염 생성 위치에 재순환 유동(Recirculation Flow)을 유도하여 화염이 안정적으로 유지하게 한다. 잘 알려진 바와 같이, 재순환 유동은 버너헤드로부터 유출된 혼합 가스가 특정 강도 이상의 회전 성분이 발생하면 회전 유동 내부의 압력이 국부적으로 낮아져 유동이 상류로 되돌아 온다[6]. Fig. 2는 라이너 내부에 생성된 재순환 영역을 나타낸다. 그림에서와 같이 라이너 중앙 부분에 유체가 상류 방향으로 바뀌어 흐르는 부분이 보이고, 이 영역 안에서 화염은 안정적으로

Table 1 Boundary Conditions

항 목	단위	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4
Fuel Distribution Ratio	-	0	0.15	0.25	0.31
연료의 LHV	kJ/kg	16,405			
총 연료 유량	kg/s	0.1			
공기 온도	℃	400			
연료 온도	℃	20			
공기 압력	bar	14			

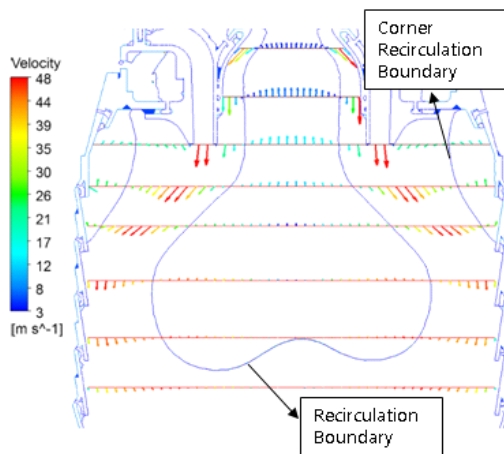


Fig. 2 Recirculation Flow in Non-reacting Flow

존재하게 된다. 또한, 재순환 유동은 연소 발생 시 하류의 뜨거운 공기를 상류의 혼합기체에 지속적으로 공급하여 연속적인 열원으로서의 역할도 한다.

3.2 반응장 해석

3.2.1 유동장

최적의 연소 조건은 화염이 소멸되지 않으면서 NOx 배출량이 최소가 되는 조건이다. 정해진 형상에서 NOx 생성량을 조절할 수 있는 가장 손쉬운 방법은 전체 연료량 대비 파일럿 연료의 비로 정의되는 Fuel Distribution Ratio를 조절하는 것이다. 본 해석에서는 0, 0.15, 0.25, 0.31의 총 4 가지 Fuel Distribution Ratio 조건을 시험하였다.

먼저, Fuel Distribution Ratio 변화에 따라 유동장이 어떻게 변하는지 살펴보았다. 압력 손실은 반응장에서 약 0.2% 증가된 6.5%가 되었고, Fuel Distribution Ratio의 변화는 압력 손실에 영향을 주지 않았다. Fuel Distribution Ratio에 따른 유동장의 변화는 Fig. 3과 같다. 재순환 영역의 전체 길이는 Fuel Distribution Ratio와 상관없이 일정하지만, 그 면적은 Fuel Distribution Ratio가 증가하면서 감소하는 경향을 보인다.

3.2.2 NOx 배출량

Figure 4는 Fuel Distribution Ratio에 따른 연소기 출구에서의 NO 배출량이다. 일반적으로 NOx의 생성량은 화염온도에 비례하는 것으로 알려져 있다[7]. 특히, 화염온도가 Thermal NOx 매커니즘이 작용하는 범위 안에 있다면 NOx 생성량은 전체 온도장 중 최대 온도에 의해 달라질 것이다. 먼저, 해석 결과를 살펴보면 Fuel Distribution Ratio 0.31로부터 감소함에 따라 NO 발생량도 점차 감소하다가 Fuel Distribution Ratio 0.15 이하에서는 거의 일정한 경향을 보인다. 이와 같은 경향성은 Fuel Distribution Ratio에 따른 온도장의 변화(Fig. 5)를 통해 설명할 수 있다. 그림에서 Fuel Distribution Ratio 0.25 이상에서는 파일럿과 메인 화염의 구분이 명확하다. 하지만 Fuel

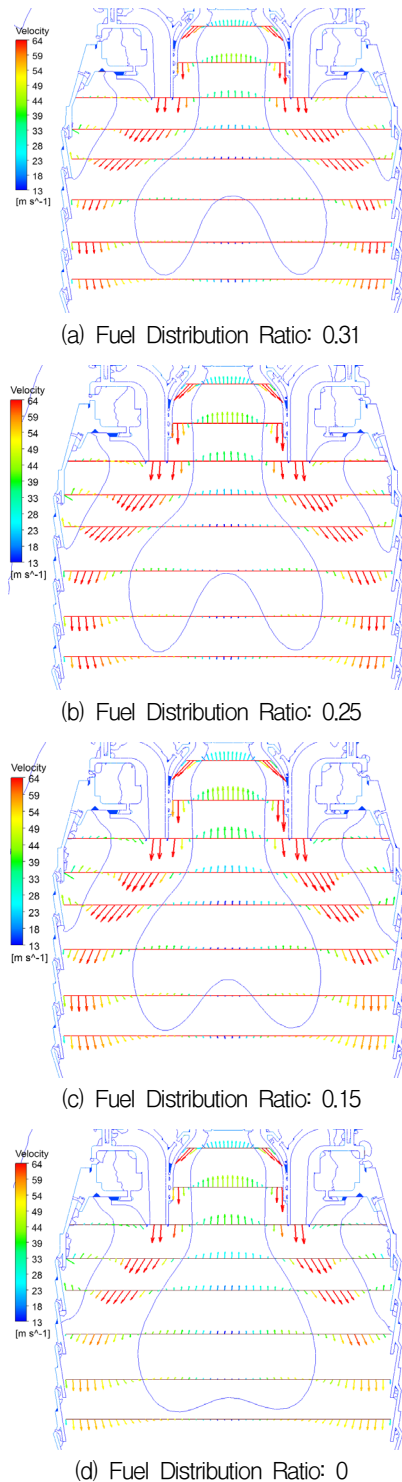


Fig. 3 Variation of Flow Fields with Fuel Distribution Ratio

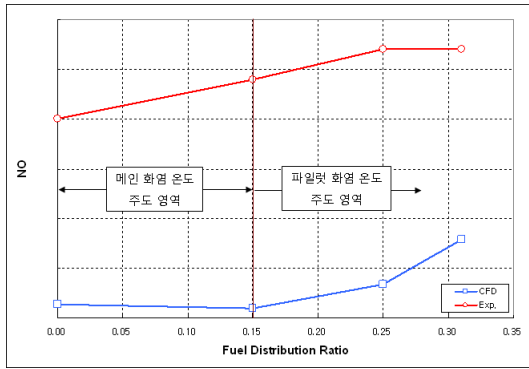


Fig. 4 Variation of NO Formation with Fuel Distribution Ratio

Distribution Ratio가 감소함에 따라 파일럿 화염의 크기는 점점 작아지고, Fuel Distribution Ratio 0.15 이하에서는 파일럿과 메인 화염의 구분이 사라지면서 균일한 온도 분포를 띄게 된다. 이와 같은 온도장 변화로 인해 NO의 생성량도 Fuel Distribution Ratio 0.15 이하에서 거의 일정하게 유지된다. 하지만 Fig. 4에서 시험결과는 Fuel Distribution Ratio가 감소함에 따라 NOx 생성량도 꾸준히 감소한다. 따라서 해석결과는 Fuel Distribution Ratio 0.15 이하에서는 시험결과를 제대로 예측하지 못하는 것으로 나타나며 이 구간에 대해서는 향후 추가적인 연구가 필요하다.

3.2.3 Profile Factor

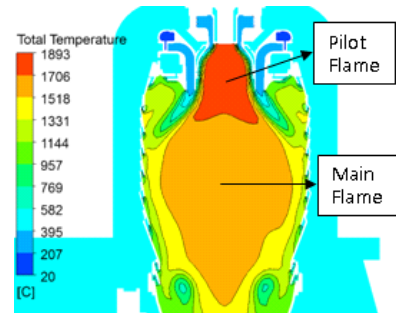
연소기는 설계점에 부합하는 유동을 터빈에 전달해야 한다. 특히, 연소기 출구의 온도 분포는 중요한 설계 조건 중 하나이다. 온도분포는 아래에 정의된 Profile Factor를 이용하여 표현하는데, 터빈 냉각설계를 위하여 Profile Factor가 1.2보다 작아야 한다.

$$Profile\ Factor = \frac{T_{mr} - T_3}{T_3 - T_2}$$

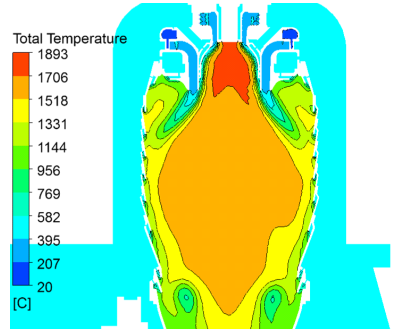
where, T_{mr} = Circumferential Mean Temperature

T_2 = Combustor Inlet Temperature

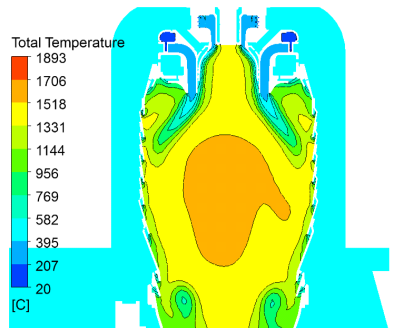
T_3 = Combustor Outlet Temperature



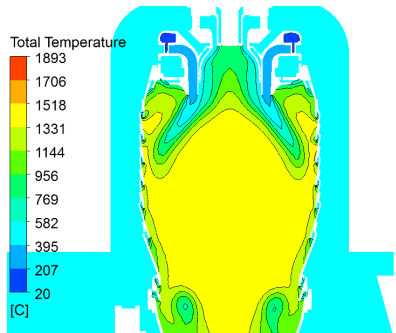
(a) Fuel Distribution Ratio: 0.31



(b) Fuel Distribution Ratio: 0.25



(c) Fuel Distribution Ratio: 0.15



(d) Fuel distribution Ratio: 0

Fig. 5 Variation of Temperature fields with Fuel Distribution Ratio

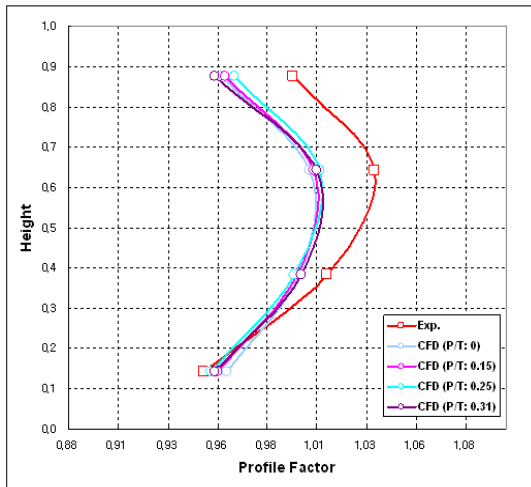


Fig. 6 Profile Factors for Different Fuel Distribution Ratio

Figure 6은 Fuel Distribution Ratio 변화에 따른 Profile Factor를 계산한 결과이다. 계산 결과 Fuel Distribution Ratio 변화에 따른 Profile Factor에 큰 변화는 없었다. 한편 약 0.6의 높이에서 1.01의 최대값이 계산되었고, 시험결과와 비교하였을 때, 최대 0.02의 오차를 갖는 매우 유사한 값을 예측하였다.

4. 결 론

바이오가스를 연료로 사용하는 가스터빈 연소기 수치해석을 수행하였다. 본 연구는 연소기의 비반응장과 반응장의 해석을 통해 연소기의 주요 설계점들을 검증하였다. 비반응장 해석의 경우 복잡한 모델링 현상이 수반되는 연소 현상이 포함되지 않았기 때문에 결과들이 실제 현상을 매우 정확하게 예측하였다. 압력손실과 공기분배비의 오차는 각각 0.64%와 0.2%였다. 반응장에서는 비반응장과 비교하여 압력손실이 0.2% 증가된 6.5%로 계산되었다. 하지만, 압력손실과 공기분배비 모두 Fuel Distribution Ratio에 따른 변동은 없었다. NO_x 생성의 경우 Fuel

Distribution Ratio 0.15 이하에서는 시험값의 경향성을 예측하지 못했다. 마지막으로 Profile Factor를 계산하여 설계 요구조건과 비교하여 설계 타당성을 검토하였다.

후 기

본 연구는 지식경제부 전력산업원천기술개발사업의 연구비 지원에 의해 수행된 결과의 일부이며 관계자 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. Turrell, M. D. and Stopford, P. et al., "CFD Simulation of the Flow Within and Downstream of a High-swirl Lean Premixed Gas Turbine Combustor", Proceedings of ASME Turbo Expo 2004 Power for Land, Sea, and Air, June 2004
2. Lefebvre, A. H., Gas Turbine Combustion, 2nd ed., Taylor & Francis, 1999
3. Jyothishkumar, V., Ganesan, V., "Gas Turbine Combustor-Modeling and Optimization", Proceeding of IMECE 2005, Paper 2005-80794
4. ANSYS CFX User Guide
5. Reddy, G. A. and Ganesan, V., "Non-reacting Flow Analysis from Combustor Inlet to Outlet using Computational Fluid Dynamics Code", Defence Science Journal, Vol. 54, No. 4, October 2004, pp. 455-467
6. Gupta, A. K. et al., Swirl Flows, Abacus Press, 1984
7. Warnatz, J., Maas, U., and Dibble, R.W., Combustion, 3rd ed., Springer, 2000