

LNG 연료를 이용한 가스 터빈 연소기의 연소유동 해석

김태호* · 강기하* · 최정열**† · 김성철***

Analysis of Combustion Flow of LNG-Fueled Gas Turbine Swirl Burner

Taeho Kim, Ki-Ha Kang, Jeong-Yeol Choi and Sung-Chul Kim

ABSTRACT

Two- and Three- dimensional numerical simulations are carried out to understand the combustion characteristics of LNG-fueled gas turbine combustor for power generation using imported and domestic natural gases. Reacting flow characteristics of the swirl stabilized natural gas combustor were understood from the numerical results with the flow conditions selected from the gas turbine operation data. The thermal influences of different natural gases were very small and the fuel composition and flow rate were considered to be tuned well. The flow structures of the recirculation and combustion region was understood from the comparison of the two- and three-dimensional results. The complexity of the three-dimensional swirl flows inside the gas turbine combustor with multiple swirlers was understood those resulting from the interactions of the stage and pilot burners.

Key Words : 가스 터빈 연소기(Gas Turbine Combustor), 선회류(Swirl Flow), 액화천연가스(LNG, Liquefied Natural Gas), 전산유체역학(CFD, Computational Fluid Dynamics)

기 호 설 명

MW molecular weight	Φ equivalence ratio
x_i mole fraction of species i	\dot{m} flowrate
HHV higher heating value	

1. 서 론

효율적 에너지 이용과 대기 오염의 문제로 인하여 저공해 가스 터빈 연소기 연구에 대한 필요성이 증대되어, 선회류를 이용한 캔(can)형 연소기를 가지는 중·대형 가스 터빈 개발은 근래에

중요한 연구 과제가 되고 있다.[1] 최근 사용되고 있는 실용적인 산업용 가스 터빈 엔진들은 대부분 선회 안정화된 난류 연소 방식을 채택하고 있으며 난류와 화학반응의 결과로써 많은 중간 생성물들이 생성된다. 따라서 가스 터빈의 연소기 내의 화염 구조와 안정성 및 공해 물질의 생성 기구에 대한 연구의 필요성이 점점 커져가고 있으며, 가스 터빈 연소기의 설계에 있어서는 선회류, 난류, 화학반응, 연소기의 복잡한 기하학적인 구조 등에 대한 총괄적인 고려가 필요하다.

선회류는 연료와 공기의 혼합을 촉진하며 화

* 학생회원, 부산대학교 항공우주공학과 대학원

** 정회원, 부산대학교 항공우주공학과

*** 정회원, 한국전력연구원

† 연락처, E-mail: aérochoi@pusan.ac.kr

염 구조와 화염의 안정성을 결정하고 연소 속도를 지배하는 난류 강도와 체류 시간을 제어하는 것으로 알려져 있다. Ikeda등[2]은 선회류를 동반한 가스 터빈 연소기 내의 재순환 영역의 거동을 포함한 유동상태, 연료와 공기의 혼합, 온도 및 온도분포 등을 조사하였고, Takashi[3], 이강엽[4] 등은 이중 선회에 의한 난류 분무 화염의 연소 특성에 관한 연구를 하였으며, Chang[5] 등은 선회 수(swirl number)가 증가함에 따라서 평면 화염(flat flame)이 형성되고, 재순환 영역이 확대되며, NO_x 배출이 감소한다는 연구 결과를 얻었다. 그러나 그동안의 많은 연구가 단순한 모델에 대한 연구가 주를 이루고 있어, 실제 복잡한 모양을 가지는 실제 연소기에 대한 연구는 매우 제한적이다.

본 연구의 목표는 수입 천연 가스와 동해 가스의 상이한 연료 조성비로 인한 연소 특성이 가스 터빈이나 그의 운전에 미칠 영향을 예측하고, 개선의 여지가 없는지를 알아보기 위한 기본적인 연구로써 수행 되었다. 상이한 연료 조성을 가지는 복잡한 3차원 반응 유동장에 대한 해석을 통하여 실제 형상의 가스 터빈 연소기 내의 연소 및 유체역학적 특징을 살펴보고자 한다.

2. 천연가스의 열화학적 특성

2.1 천연가스의 조성

본 연구에서 고려한 천연가스의 연료 조성을 Table 1에 정리하였다. 아래 표와 그림에서 기존에 이용하던 수입 천연가스는 "Old-Natural Gas" 로 표시하였으며, 동해 가스전에서 생산되는 국산 천연가스 연료는 "New-Natural Gas" 로 표시하였다. 국산 천연가스는 단위 질량당 메탄 및 프로판 비율을 증가시켜 열량을 보완한 것이다.

2.2 단열 화염 온도 해석

전산 유체 해석에 앞서 조성이 다른 두 천연가스의 열량 특성을 비교하기 위하여 CEA 코드를 이용하여 단열 화염 온도를 비교하였다.[6,7] Fig. 1은 예열된 연료 온도에 따른 단열화염 온도를 비교한 것이다. 희석 공기를 포함한 연소기 전체의 당량비는 0.4 수준이지만 실제 화염 온도를 살펴보기 위하여 이론 당량비 조건을 택하였다. 유입공기의 조건은 가스 터빈의 운용 조건으로부터 선택된 기준 값인 644.15 K, 25.1 bar 로 정하였다. Fig. 1의 해석의 결과는 기존 천연가스가

Table 1 Composition of Old and New Natural Gases

	Old Natural Gas	New Natural Gas
MW, kg/kmol	18.1208	18.6059
HHV, kcal/kg	13009.22	12612.98
Substances	Mole Fractions	
CH ₄	0.901444	0.89073
C ₂ H ₆	0.058606	0.04714
C ₃ H ₈	0.026565	0.03662
n-C ₄ H ₁₀	0.00555	0.00451
i-C ₄ H ₁₀	0.005738	0.00444
n-C ₅ H ₁₂	0.000031	0.00056
i-C ₅ H ₁₂	0.000205	0.00097
C ₆ H ₁₄	-	0.00067
N ₂	0.001861	0.00229
CO ₂	-	0.01207

약간 높은 온도를 보이지만 넓은 연료 온도 범위에서 그 차이는 최대 2 K 정도로, 두 연료 조성의 열량 차이에 의한 효과는 크지 않은 것으로 보인다. Fig. 2는 연료 온도를 400 K로 고정하고 당량비에 따른 단열 화염 온도를 비교한 것으로서, 연소기 출구 온도에 해당한다. 이 결과는 두 가지 연료 조성에서 거의 같은 수준의 온도를 보이고 있으며, 당량비 0.42 정도까지 터빈 입구 온도 한계인 1,600 K 이하에서 연소 온도가 유지되고 있음을 보여준다. 한편 본 해석의 결과는 1,600 K 로 설정한 터빈 한계 온도와 함께 전산 유체 해석을 위한 연소기 유입 공기량을 계산에 이용하였다.

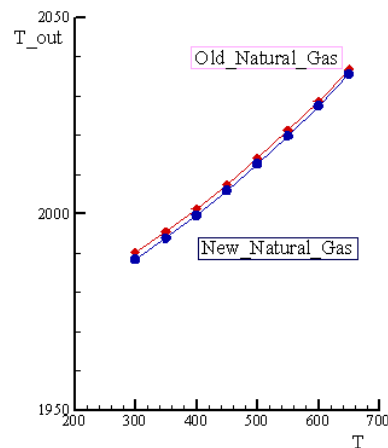


Fig. 1 Dependency of adiabatic flame temperatures on fuel temperature at stoichiometric condition

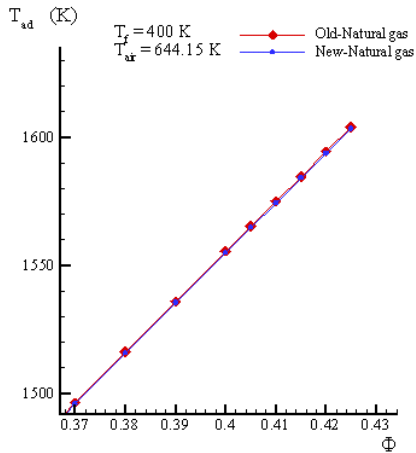


Fig. 2 Dependency of combustor exit temperatures on overall equivalence ratio

2.3 연소 속도 해석

천연가스의 서로 다른 조성이 연소 특성에 미칠 수 있는 차이를 살피기 위하여 여러 온도, 압력 및 당량비 조건에서 정압 상태의 점화 지연 시간을 비교하였다. 해석에는 GRI Mech-3.0 [8] 상세 반응 기구를 이용하였으며, C3 이상의 탄화수소 성분은 프로판으로 대체하였다. 해석에는 Chemkin-II 패키지를 이용하여[9], 10기압에서의 결과를 Fig. 3에 도시하였다.

이상의 결과로부터 넓은 조건에서 두 연료 조성 차이에 의한 영향은 미미하며, 국산 천연가스의 성분은 기존의 것과 동일한 수준으로 잘 조정된 것으로 판단된다.

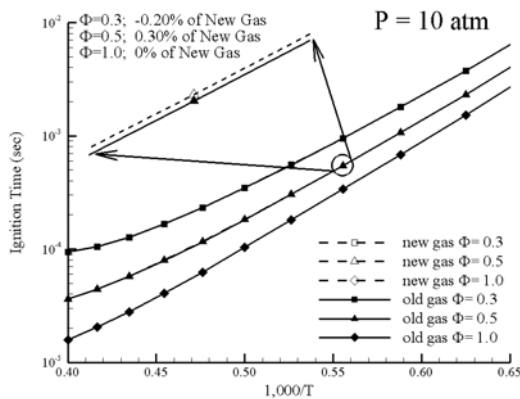


Fig. 3 Dependency of ignition delays of the natural gases on initial temperature for several equivalence ratios

3. 지배방정식 및 해석기법

3.1 지배 방정식과 해법 및 난류 모델

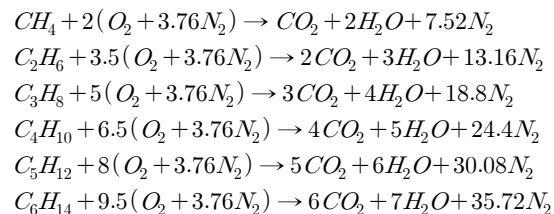
본 연구는 Fluent V.6.2와 비정렬 격자계를 이용하여 수행하였으며, 연소기 내부는 전적으로 아음속 유동이므로 “segregated solver”를 이용하였다.[10] 이 경우 유동은 연속 방정식과 운동량 방정식에 의하여 지배되며, 에너지 방정식은 열 해석을 위하여 느슨하게 연계된(loosely coupled) 형태로 풀이된다. 적분형 지배 방정식은 유한 체적법(FVM)을 이용하여 대수 방정식으로 전환되며, 미분 계수의 근사에는 중심 차분 및 풍상 차분 방법이 이용된다. “Segregated solver”는 선형화된 하나의 지배 방정식을 point-implicit 대수 방정식 해법으로 해석한 후, 구한 값들을 이용하여 다음 변수의 방정식을 풀어 나가는 순서로 수렴 시까지 반복계산을 수행한다.

Fluent 코드에서 난류 유동 해석에는 RANS (Reynolds-Average Navier-Stokes) 기반과 LES (Large Eddy Simulation) 기반의 여러 가지 난류 모델을 이용 할 수 있다. 본 연구에서는 이들 중에서 다양한 난류 연소 모델의 적용 가능성과 계산 부하를 고려하여 RANS 기반의 2-방정식 standard $k-\epsilon$ model을 사용하였다.

3.2 연소 모델링

연소 유동의 해석을 위해서는 질량, 운동량, 에너지 및 난류 보존 방정식과 더불어, 각 성분의 질량 확산과 연소에 의한 생성과 소멸을 포함하는 보존방정식을 해석하여야 한다.

탄화수소 연료의 상세 반응은 50개 이상의 성분과 300개 이상의 반응 기구를 고려하여야 하기 때문에 계산의 부하가 너무 크며, 중요 성분만 고려하여 해석을 하는 총괄 반응 해석이 실용적이다. 본 연구에서는 6가지 주요 연료 성분의 총괄 반응을 이용하여 탄화수소 연료의 혼합물인 천연 가스의 연소 반응을 모사하였다. 각 연료의 Arrhenius 반응 속도 데이터는 Fluent 코드에 포함된 기본 값을 이용하였다.



그러나 반응 속도 데이터가 지배하는 연소 속도는 층류 화염편에 대해서 유효하며, 계산 격자가 충분한 분해능을 가지지 못하는 경우 난류가 화염에 미치는 난류-연소 상호 작용을 적절히 모델링하여야 한다. 정확성 및 유용성과 한계에 대해서는 여러 논의가 있으나 본 연구에서는 편의성 측면에서 가장 간단한 난류-연소 상호 작용 모델인 EDC(Eddy Dissipation Concept)를 이용하였다. EDC 모델에서 반응 성분의 생성률은 격자로 포착되지 않는 난류 에디 내부에서 결정된다는 개념으로부터 출발하여 Arrhenius 반응 속도와 난류 혼합 속도 중 최소의 값을 이용하여 결정된다.

4. 연소 유동장 해석 결과

4.1 선회 화염에 대한 해석 및 검증

연소 모델과 난류 모델의 선택이 적절한지 판단하기 위해서 Brode 등이 이 스윙 안정형 가스 터빈 연소기에 대한 연소특성 실험 모델에 대해서 해석을 수행하였다.[1] 계산 조건은 압력 0.463 MPa, 온도 660 K, 혼합기 유량 52.41 g/s, 당량비 0.6, 스윙각 45° 이다. Fig. 4는 스윙 화염의 실험 사진이며, Fig. 5는 온도 분포와 유선을 나타낸 Brode 등의 수치해석 결과로써, 중심에서의 재순환 영역과 코너에서의 재순환 영역의 형성을 확인 할 수 있다. Fig. 6은 본 연구의 해석 결과로써, 재순환 영역의 형상과 위치, 온도 분포를 비교하였을 때 본 논문의 해석 방법이 적절한 것으로 판단되어, 이를 바탕으로 2차원 및 3차원 해석에 적용하였다.

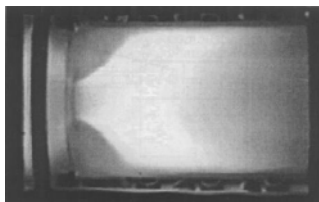


Fig. 4 Photographic images of stable swirl flame.[1]

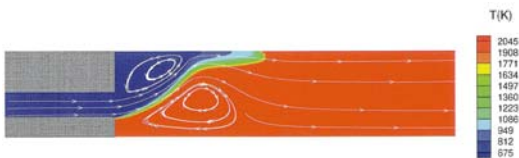


Fig. 5 Temperature and streamlines of the stable swirl flame by Brode et al.[1]

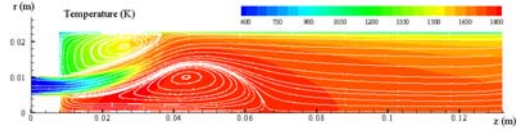


Fig. 6 Temperature and streamlines of the stable swirl flame, present result.

4.2 연소기 해석 모델 및 해석 조건

본 연구에서 고려한 캔형 가스 터빈 연소기의 개략도를 Fig. 7에 도시하였다. 중앙의 Pilot 버너를 중심으로 주위에 Stage A 및 B로 구성되는 8개의 버너가 배치되어 있으며, 각 버너는 공기가 유입되는 선회기와 중앙의 연료 분사기로 구성되어 있다. 가스 터빈의 작동 특성을 고려하여 pilot 에서는 중앙에서 연료가 분사되고, stage 버너에서는 예혼합된 상태로 유입되는 것으로 설정하였다.

연소기에의 공기 유입은 Pilot 버너와 Stage A, B 버너를 포함하는 1차 공기 유입 영역과, 4곳의 측면 슬롯을 통하여 공기가 유입되는 2차 영역 및 희석공기가 유입되는 3차 영역으로 구분된다. 본 연구에서 희석 공기가 유입되는 3차 영역은 고려하지 않았으며, 2차 영역까지는 전반적으로 Fig. 8과 같은 축대칭 형상이다. 연소 유동 해석은 Pilot 버너만이 작동하는 상태의 축대칭 및 삼차원 해석을 일차적으로 수행하였으며, 이후 Stage A 및 B를 포함하는 완전한 삼차원 해석을 수행하였다.

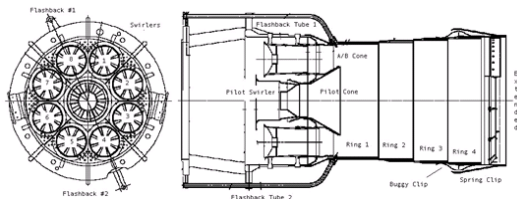


Fig. 7 Combustor section of Siemens W501F gas turbine combustor

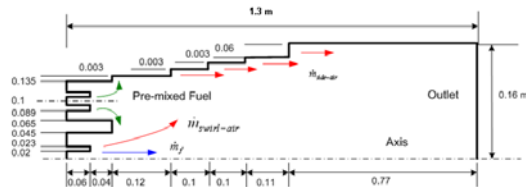


Fig. 8 Computational domains of 3-D combustor model

연소기 유입공기의 조건은 가스 터빈의 운용 조건으로부터 선택된 기준 값인 644.15 K, 2.51 MPa로 정하였다. 가스터빈 전체에 대한 기준 연료 유량은 7.38 kg/s이며, 터빈 입구 온도를 1,600 K으로 유지시키는 당량비 0.42에 해당하는 공기 유량은 296.32 kg/s로 추정된다. 이상의 연료 및 공기 유량은 전체 16개의 캔형 연소기에 동일하게 분배되는 것으로 간주하였으며, 연소기 내의 유량 배분은 실측된 공기 유입부의 단면적에 비례하여 설정하였다. 연소기 내의 압력은 일정하다고 가정하였으며, 벽면온도는 유입 공기의 온도로 유지된다고 가정하였고, 점착 조건 및 벽법칙을 적용하였다.

4.3 Pilot 버너 연소 유동의 축대칭 해석

축대칭 해석에서는 축대칭 조건을 주고 스윙 각 45°와 60°에 대하여 선회류 모델을 이용하여 계산을 수행하였으나, 선회류에 의한 내부 유동의 차이가 두드러 지지 않으므로, 45°에 관한 결과만을 Fig. 9에 나타내었다. 유선에서 보듯이 선회류에 의한 재순환 영역은 노즐 출구에서 발생되어 공기와 연료의 상호작용으로 인해서 대칭축을 중심으로 2차 재순환 영역이 생성됨을 관찰할 수 있다. 재순환 영역의 생성은 연료와 공기가 빠르게 섞이게 하는 역할과 화염을 안정화시키는 역할을 한다. 연소기 출구의 속도 유선은 회색 공기에 의해 안정화 되어 터빈 입구에서의 불안정 요소를 제거하고 있음을 관찰할 수 있다. 천연가스 조성에 따른 연소 유동장의 차이는 크지 않았으나, 평균 연소 온도만이 열량 값에 따라 최대 5K 이내의 평균 온도차를 보였다.

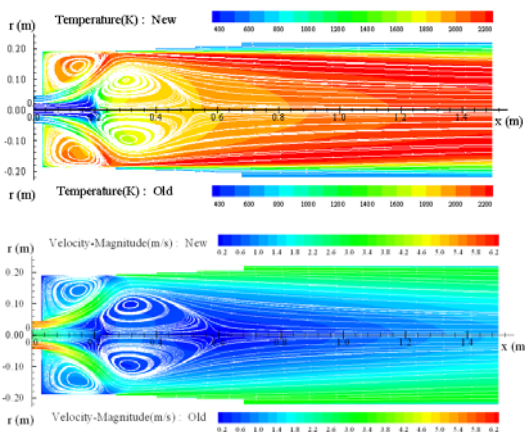


Fig. 9 Axial-symmetric results of temperature and velocity magnitude distributions with streamlines

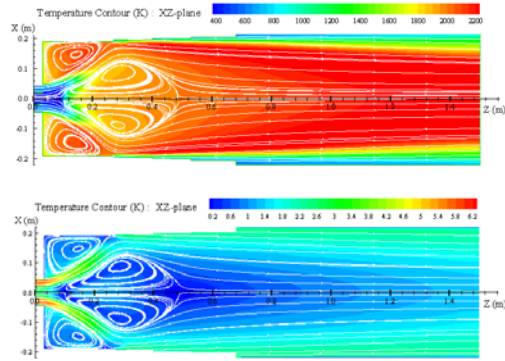


Fig. 10 3-D results of temperature and velocity magnitude distributions with streamlines

4.4 Pilot 버너 연소 유동의 삼차원 해석

축대칭 해석에서는 약 20,000개의 계산 격자를 이용한 반면, 동일한 조건의 삼차원 해석에서는 약 882,752개의 격자를 이용하였으며, 해석 결과를 Fig. 10 - 12에 도시하였다. 삼차원 해석에서는 축대칭 해석에 비하여 연료와 공기의 축 방향 속도가 다소 작게 나타나며, 2차 재순환 영역이 노즐에 가깝게 형성되는 경향을 보였다.

Fig. 11은 재순환 영역 부근에서의 축방향 속도 분포를 유선과 함께 도시한 그림이며, Fig. 12은 축방향 각 단면에서의 온도 분포를 유선과 함께 도시한 그림으로써, 축 단면에서 선회류의 특징을 잘 타내고 있다. 이차원 해석 결과와 비하여 연료와 1차 공기 및 2차 공기의 혼합 정도는 회전 유동에 의하여 상당히 영향을 받고 있음을 알 수 있으며, 연소기 출구의 평균 온도는 2차원 해석에 비하여 4K 정도 낮게 예측되었다.

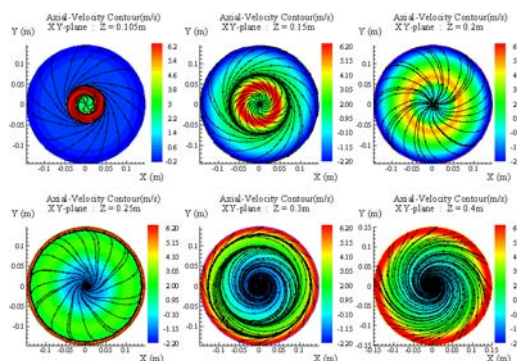


Fig. 11 Axial velocity distributions with streamlines

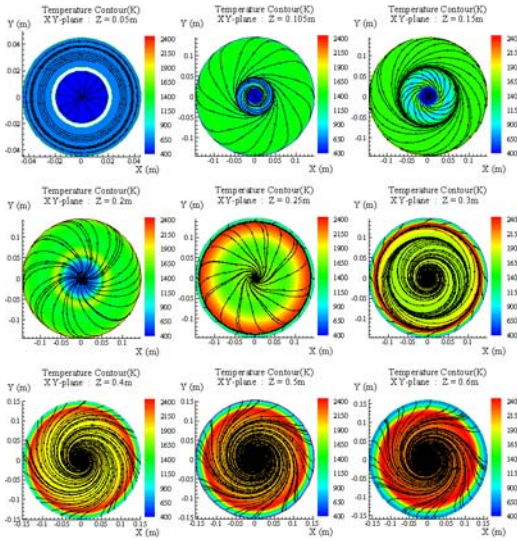


Fig. 12 Temperature distributions with streamlines

4.5 전체 연소기 형상의 3차원 해석

위의 해석 결과를 바탕으로 Pilot 버너 및 Stage A, B 버너를 포함한 전체 연소기 형상의 연소 유동을 해석하기 위하여 Fig. 13와 같이 1,008,115개의 셀로 구성된 삼차원 격자계를 구성하였다. 공기 유량의 배분은 공기 유입 부분의 면적 비례에 의하여 정하였으며, 불확실한 부분을 보완하기 위하여 몇 가지 다른 Pilot 버너 선회 유량에 대한 해석을 수행하였다.

Fig. 14는 전체 연소기 축 단면에서의 온도 분포를 도시한 그림이다. 각 stage 버너는 pilot 버너에 비하여 약간 전방에 위치하고 있으며 연료와 공기가 예혼합되어 공급되기 때문에 다소 전방에 화염이 형성되는 것을 알 수 있으며, 전체 유동장은 대체로 축대칭 형태의 분포를 가지게

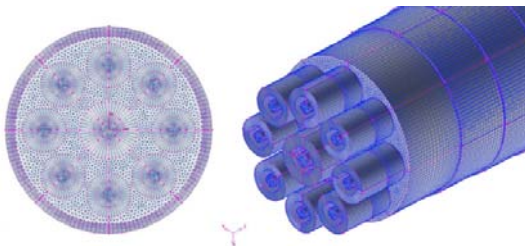


Fig. 13 Computational Grid of 3-D Full Combustor Geometry

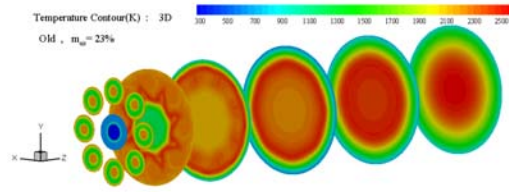


Fig. 14 Temperature distributions along the axial cross-sections

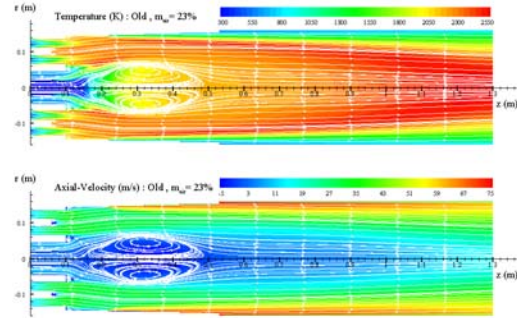


Fig. 15 Temperature and velocity magnitude distributions with streamlines in three-dimensional full combustor

됨을 확인할 수 있다. Fig. 15는 연소기 종단면에서의 온도 분포와 속도 크기 분포를 유선과 함께 도시한 것으로써, 연소기 가운데 영역에서 중앙 선회 재순환 영역(CTRZ, Central Toroidal Ricirculation Zone)이 형성됨을 볼 수 있으며, 각 stage 버너에서는 매우 작은 재순환 영역만이 확인된다. 위의 Fig. 15에서 각 stage 버너의 선회 유동에서 재순환 영역이 잘 보이지 않는 이유가운데 하나는 중앙 재순환 영역과의 상호작용에 의한 삼차원적 효과로 인하여 재순환 유동의 선회 중심이 stage 버너의 중심축에서 벗어나 있기 때문이다.

Pilot 버너 유동과 stage 버너 유동의 삼차원적 상호 작용을 살피기 위하여 축 단면에서의 유선 분포를 Fig. 16에 도시하였으며, stage 버너에서의 유선 분포를 확대하여 Fig. 17에 도시하였다. 선회기 직후에 형성된 초반의 선회 유동들은 삼차원적인 상호 작용에 의하여 해체되어 0.22 m 위치까지 균일화되는 과정을 거친다. 그러나 이후 재순환 영역은 보이지 않지만, 다시 선회 유동의 특징을 보이다가 연소기 하류에서는 완전히 균일한 유동이 형성되는 것이 확인된다.

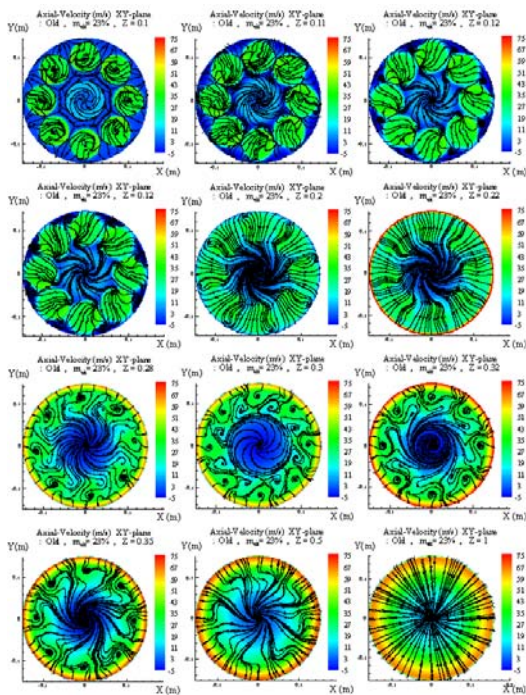


Fig. 16 Velocity magnitude and streamlines along the axial cross-sections

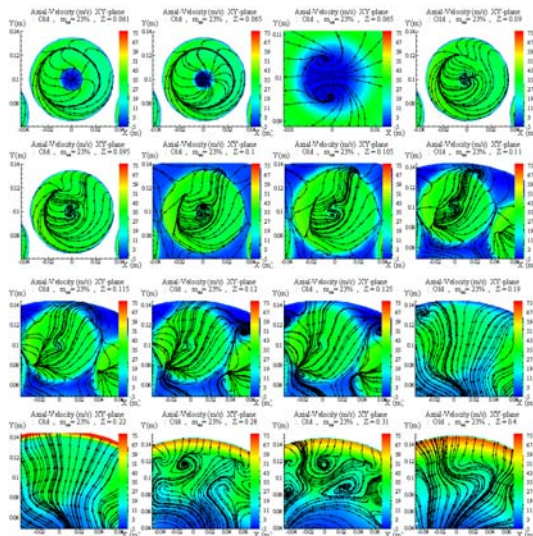


Fig. 17 Swirl flows in a stage burner

4. 결론

본 연구에서는 두 개의 서로 다른 조성을 가지는 천연가스를 연료를 이용하는 가스터빈 연소

기의 내부 연소 유동을 살피기 위한 연구를 수행하였다. 두 가지 천연가스의 열화학적 특성을 살피기 위한 반응 해석에서 두 천연 가스의 조성 차이에 따른 열화학적 차이는 크기 않아 운용 조건에서 연료 조성 및 유량은 잘 조절된 것으로 보인다. 가스터빈 연소기에 대한 이차원 및 삼차원 전산 유체 해석 결과를 비교해 봄으로써 선회류에 의한 재순환 영역의 형성과 화염 구조를 살펴볼 수 있었으며, 다중 선회류를 가진 삼차원 연소기에 있어 stage 버너와 pilot 버너 선회류의 상호 작용에 의한 복잡한 내부 선회 유동의 형성 과정을 살펴볼 수 있었다. 시간이 절반정도 절감되었으며 질소를 불활성이라고 가정한 수소-산소 반응에 비하면 3배 이상의 해석시간이 소요되는 것을 확인 할 수 있다.

후 기

본 연구는 한국 전력연구원의 자문 및 부산대학교 교내 연구비의 지원으로 수행된 결과이며 지원에 감사드립니다.

참고문헌

[1] Broda, J. C., Seo, S., "An Experimental Study of Combustion Dynamics of a Premixed Swirl Injector", *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 27, No. 2, 1998, pp.1849~1856.

[2] Ikeda, Y., Hosokawa, S. and Nakajima, T., "Flow Structure in a Can-type Model Gas Turbine Combustor", *JSME*, Vol.57, No.535, 1991, pp.1175~1182.

[3] Terasaki, T. and Hayashi, S., "The Effects of Fuel-Air mixing on NOx Formulation in Non-Premixed Swirl Burner," *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 26, No.2, 1996, pp.2733-2739.

[4] 이강엽, 황상순, "2중스윙류에 의한 난류분무화염의 연소특성 연구", *한국연소학회지*, Vol. 5, No. 1, 2000.

[5] Chang, Y. J. and Jeon, C. H., "A Study on the Effects of Swirling and Recirculation on the Combustion in a Non-Premixed Flame.", *Proceedings of the PNU-LGE Tianjin Joint Workshop*, July 20-22, 2005, pp.1~17.

[6] Gordon, S, and McBride, B.J, "Computer Program for Calculation of Complex Chemical

Equilibrium Composition and Applications," *NASA RP-1311*, Oct., 1994.

[7] 신재렬, 최정열, 최환석, "화학 평형과 열복사를 고려한 로켓 플룸 유동 해석," *한국추진공학 회지*, 제9권 제1호, 2005년 3월, pp.35~46.

[8] Smith, G. P., Golden, D. M., Frenklach, M., Moriarty, N. W., Eiteneer, B., Goldenberg, M., Bowman, C.T., Hanson, R.K., Song, S.,

Gardiner Jr., W.C., Lissianski, V.V., and Qin, Z., *GRI-Mech*, www.me.berkeley.edu/gri_mech/

[9] Kee, R. J., Rumpley, F. M., and Miller, J.A., *Chemkin-II: A Fortran Chemical Kinetics Package for the Analysis of Gas Phase Chemical Kinetics*, Gov. Pub. SAND89-9009B. Sep. 1989.

[10] Fluent 6.1 User's Guide, Vol. I, II, III.