

발전용 가스터빈 연소기의 천연가스 연소유동 해석

김태호* · 최정열**

Natural Gas Combustion Analysis in Power Generation Gas Turbine

Tae-Ho Kim*, Jeong-Yeol Choi**

ABSTRACT

Two and Three dimensional numerical simulations have been carried out to understand the combustion characteristics of LNG-fueled gas turbine combustor for power generation. Focus of the study was given to the influences of different fuel composition of imported and domestic natural gases with the flow conditions selected from the gas turbine operation data. Reacting flow characteristics of the swirl stabilized natural gas combustor were understood from the comparison of the two-dimensional and three-dimensional results. The thermal influences of different natural gases were very small and the fuel composition and flow rate were considered to be tuned well.

Key Words : Swirl, Recirculation zone, Secondary air, Non-premixed turbulent flame

1. 서 론

가스터빈에 이용되는 일반적인 연소기에는 연소기 중심에서 분사되는 연료가 연료 분사기 주위의 스월 베인을 통하여 유입되는 공기와 혼합되어 연소하는 Can 형 연소기와 여러 개의 Can 형 연소기를 원형으로 묶여져 연소하는 방식이 많이 쓰인다. 이런 연소기는 연소기 상류에서 연료와 공기가 예혼합 상태로서 당량비 영역을 벗어난 연소를 하게 되고, 연소영역에서는 과도한 공기가 화염온도를 줄임으로써 고온에서 생성되는 NO_x 가 제거가 된다. 대부분의 회박 예혼합 연소기 시스템에서는 깨끗하고 효율적인 연소의 목적을 위하여, 스월 유동을 통하여 발달된 재순환 영역을 가지는 화염으로 연소를 안정화 시킨다.

가스터빈 연소기는 단일 또는 다중의 스월 버너를 중심으로 이차의 연료 분사와 회석 공기 및 냉각 공기가 유입되는 삼차원 형상을 지니고 있다. 따라서 가스터빈 연소기의 연소 성능은 스월

버너의 연소 특성성능에 지배 받으므로 많은 연구가 복잡한 삼차원 형상의 가스터빈 연소기 이전에 좋은 성능을 가지는 스월 연소기의 버너의 개발에 연구에 집중되고 있다. 스월 유동에 의하여 안정화된 가스터빈 연소기의 연소 유동은 강한 난류에 의하여 지배 받으며, 연료와 공기의 혼합은 물론, 연소 화학 반응 과정 및 배출물의 발생과정이 난류 유동이 수반되어 진행되므로 해석적으로 매우 복잡한 문제를 발생한다. 이러한 난류 연소 문제의 해결에는 서로의 장단점이 있는 여러 가지 해석적 접근 방법이 있을 수 있다.

본 연구에서는 연료조성 변화에 따른 LNG 연료 가스터빈 스월 버너의 연소특성을 알아보기 위하여 상용 프로그램인 Fluent 6.2.16 을 이용하여 간단한 2차원 축대칭 모형과 이를 확장한 3차원 모형 연소기의 스월 연소 유동에 대한 연소 해석을 수행하였다. 그리고 CEA 코드를 이용하여 천연가스 연료의 조성에 따른 단열화염온도를 구하여 계산조건에 기초 자료로 사용하였으며, 스월과 함께 이차 공기 유입에 의한 화염길이의 변화와 속도 유선의 안정화에 대한 전산 유체 해석을 수행하였다.

* 부산대학교 항공우주공학과 대학원

** 부산대학교 항공우주공학과

† 연락처, aerochoi@pusan.ac.kr

2. 지배방정식 및 해석기법

2.1 유동장의 지배방정식

본 연구에서는 Fluent Code에서 복잡한 반응 유동 해석에 이용될 수 있는 segregated solver를 이용하였다. 이 경우 유동장은 다음의 적분형 연속 방정식과 운동량 방정식에 의하여 지배되며, 에너지 방정식은 열해석을 위하여 느슨하게 연계된 형태로 풀이된다.

$$\oint \rho \vec{v} \cdot d\vec{A} = 0 \quad (1)$$

$$\oint \rho \vec{v} \vec{v} \cdot d\vec{A} = - \oint p \vec{I} \cdot d\vec{A} + \oint \vec{\tau} \cdot d\vec{A} + \oint \vec{F} dV \quad (2)$$

2.2 난류 모델링

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 standard $k-\epsilon$ model을 사용하였다. Standard $k-\epsilon$ model은 난류 운동에너지 k 와 난류 소산을 ϵ 의 두 개의 모델 방정식을 사용하는 2방정식 모델이다. 이 모델에서 유동은 완전 난류 유동으로 간주하고, 분자 점성 효과는 무시한다. standard $k-\epsilon$ model의 전달 방정식은 다음과 같다. 각 항의 자세한 기술은 지면상 생략하며 참고문헌 [5]에 기술되어 있다.

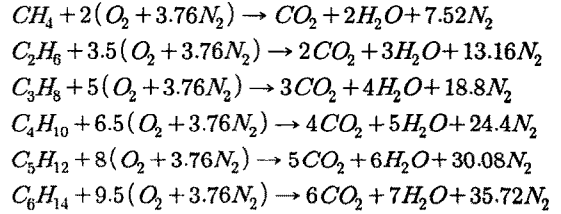
$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M + S_k \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \epsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_1 \frac{\epsilon}{k} (G_k + C_3 \epsilon G_b) - C_2 \epsilon \rho \frac{\epsilon^2}{k} + S_\epsilon \quad (5)$$

2.3 연소 모델링

2.3.1 LNG 연료의 반응 기구

탄화수소 연료 기체의 상세 반응 기구는 50개 이상의 성분과 300개 이상의 화학 반응을 고려하여야 하기 때문에 모든 성분을 고려하기에는 계산의 부하가 너무 크며, 일부 중요 성분만 고려하여 해석을 하는 것이 보통이다. 본 연구에서는 6가지 주요 기체 연료 성분의 총괄 반응을 이용하여 여러 가지 탄화수소 연료의 혼합물인 LNG 연료의 연소 반응을 모사하였다. 각 연료의 반응 속도 데이터는 기본 값을 이용하였다.



2.3.2 화학 반응 속도 해석

연소 유동의 해석을 위해서는 기본적으로 연소과정에서 존재하는 각 성분에 대하여 질량 확산과 화학반응에 의한 성분의 생성과 소멸을 포함하는 보존방정식을, 반응 속도 이론에 근거하여 실험 결과를 분석하여 얻어진 상세 반응 기구를 이용하여 해석하여야 한다.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_i) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} Y_i) = -\nabla \cdot \vec{J}_i + R_i + S_i \quad (5)$$

여기서 R_i 는 화학반응식에 의한 i 번째 화학종의 순 생성률, S_i 는 분산된 상의 생성률이며, 질량 확산은 Chapman-Enskog의 분자 동력학 이론으로부터 다음과 같이 정리된다.

$$\vec{J}_i = - \left(\rho D_{i,m} + \frac{\mu_t}{Sc_i} \right) \nabla Y_i \quad (6)$$

반응 속도는 다음과 같이 표현된다.

$$\hat{R}_{i,r} = \Gamma (v''_{i,r} - v'_{i,r}) \left[k_{f,r} \prod_{j=1}^{N_r} [C_{j,r}]^{n'_{j,r}} - k_{b,r} \prod_{j=1}^{N_r} [C_{j,r}]^{n''_{j,r}} \right] \quad (7)$$

여기서 N_r 은 r 번째 반응의 화학종의 수, Γ 는 반응물에 대한 third bodies의 순수효과이다.

2.3.3 난류 연소 해석: Eddy-Dissipation Model.

난류와 연소의 상호작용을 연소 해석에 포함시키는 간단한 방법으로는 EDC 모델을 이용하는 방법이 있다. EDC 모델의 정확성 및 유용성과 한계에 대해서는 여러 논의가 있으나 본 연구에서는 편의성 면에서 EDC 모델을 선택하였다. 이 경우 반응 성분의 생성률은 격자로 포착되지 않는 난류 에디 내부에서 결정된다는 개념으로부터 출발하여 Arrhenius 반응 속도와 다음의 두 식 가운데, 최소의 값을 이용하여 결정된다.

$$R_{i,r} = v'_{i,r} M_{w,i} A \rho \frac{\epsilon}{k} \min \left(\frac{Y_R}{v'_{R,r} M_{w,R}} \right) \quad (8)$$

$$R_{i,r} = v'_{i,r} M_{w,i} A B \rho \frac{\epsilon}{k} \frac{\sum_p Y_p}{\sum_j v''_{j,r} M_{w,j}} \quad (9)$$

여기서 Y_p 는 어떤 생성물 P의 질량분율, Y_R 은 반응물 R의 질량분율 이다.

2.4 해석기법

2.4.1 지배방정식의 차분화

모든 지배방정식은 임의의 스칼라 값 ϕ 의 정상 상태 보존 방정식으로 표시 될 수 있으며, 이는 임의의 부피에 대해서 다음의 적분 식으로 정리할 수 있다. 임의의 적분형 지배 방정식은 유한 체적법(FVM)을 이용하여 대수 방정식으로 전환되며, 이 경우 미분 계수의 근사에는 중심 차분 및 풍상 차분방법이 이용되었다.

$$\oint \rho \phi \vec{v} \cdot d\vec{A} = \oint \Gamma_\phi \nabla \phi \cdot d\vec{A} + \int_V S_\phi dV \quad (10)$$

여기서 Γ_ϕ 는 ϕ 의 확산 계수, S_ϕ 는 ϕ 의 단위 체적 당 생성 항을 나타낸다.

2.4.2 비선형 방정식의 선형화 및 해법

Segregated solver 에서의 선형화에는 주어진 변수에 대해, 각 미소 체적의 미지수를 이웃하는 셀의 알려진 값들로부터 구하는 내재적 해법을 사용하였다. 선형연립방정식을 풀기 위해서, Point Implicit (Gauss-Seidel) 대수 방정식 해법을 사용하였다. 선형화된 지배방정식들은 각 방정식 별로 순차적으로 풀어나가는 segregated 해법을 이용하여, 하나의 지배 방정식을 풀고 난 후, 여기서 구한 값들을 가지고 다음 지배 방정식을 풀어 나가는 순서로, 여러 번의 반복계산을 수행하여 수렴 시까지 계산이 진행된다.

3. CEA 코드를 이용한 연소해석

CEA(Chemical Equilibrium Analysis) 코드는 NASA Lewis Research Center 에서 개발하여 사용하고 있는 시스템의 열화학적인 성질들을 계산하여 주는 프로그램으로, 이론적인 로켓의 성능, Chapman-Jouguet detonation, Shock tube 또는 주어진 열적 상태에 대한 화학평형 상태에서의 화학조성을 구하는 계산에 주로 쓰인다.

본 연구에서는 조성이 다른 두 천연가스의 단열화염 온도를 계산하여, 연료 조성에 따른 열화학적 특성을 비교하는 비교 도구로 이용하였으며, 이를 바탕으로 연소기의 작동 조건 및 유량을 산출하는 도구로 이용하였다. 정압 단열 화염 온도는 반응물과 생성물의 절대 엔탈피가 동일하다는 가정으로부터 얻어진 다음 식과 Lagrange-multiplier 기법을 이용하여 Gibbs 에너지 최소화

로 구하는 화학 평형 계산을 통하여 구한다.

$$H_{Reac}^0 = H_{Prod}^0 \quad (11)$$

그림 1과 2는 당량비 1인 경우와 가스터빈 운용 조건에 해당하는 당량비 0.42 에서의 정압 단열 화염온도를 연소기 입구 온도의 함수로서 도시한 결과이다. 아래 그림에서 기존에 이용하던 수입 LNG 연료는 Old-Natural Gas 로 표시하였으며, 동해 가스전에서 생산되는 국산 LNG 연료는 New-Natural Gas 로 표시하였다. 본 해석의 결과는 1,600K 로 설정한 터빈 한계 온도와 함께 수치 해석을 위한 연소기 유입 공기량을 결정하는 데 이용하였다.

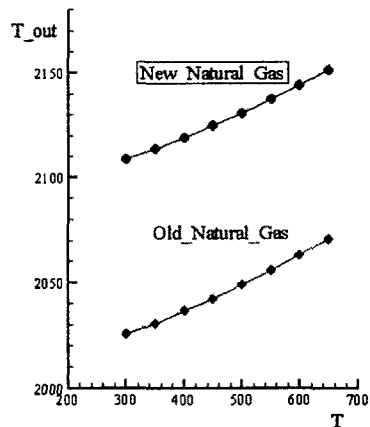


Fig. 1 이론 당량비 조건의 단열화염온도

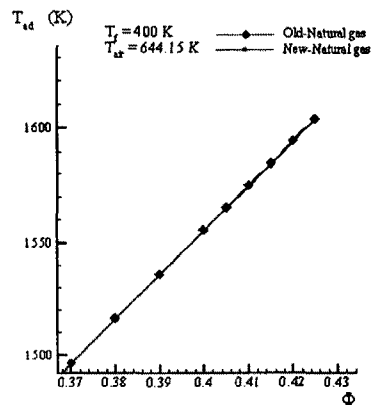


Fig. 2 가스터빈 운용 조건의 단열화염온도

4. 해석 결과

4.1 연소 해석 모델

본 연구에서 고려한 연소기는 LNG 연료를 이용하는 복합 화력 발전기용의 가스터빈 연소기로서, 1차, 2차 및 3차 영역으로 구분되며 2차 영역에서는 모두 4곳의 화염튜브의 구멍을 통해서 공

기가 유입된다. 본 연구에서는 희석 공기가 유입되는 3차 영역은 고려하지 않았으며, 2차 영역까지는 전반적으로 그림 3과 같은 축대칭 형상이다.

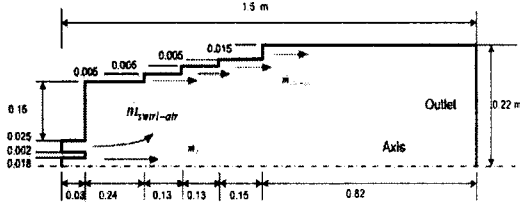


Fig. 3 Computational Domain

연소 해석은 기존의 수입 LNG와 동해 가스전에서 산출되는 LNG 연료의 가스 조성 변화에 대한 특징을 살펴보는 것을 주요 목표로 삼았다. 연소기 내의 압력은 일정하다고 보았으며 주 연료 분사기만을 고려하여 연소 및 유동 계산을 수행하였다. 벽면에서의 경계조건은 공급되는 압축 공기의 온도(644.15K)로 냉각이 된다고 설정하였다. 각 공기 및 연료 유입구에서의 유량 조건은 가스터빈의 작동 조건으로부터 산출하였으며 표 1에 정리하였다.

Table 1 유량 경계조건

	m_f (k/s)	m_{air}^{Old} (k/s)	m_{air}^{New} (k/s)
G/T Total	6.67	396.297	378.277
1 set Pilot(12%)	0.051875	0.3104	0.2963
1차영역 유입공기		0.196	0.187
2차영역 유입공기1		0.2011	0.192
2차영역 유입공기2		0.207	0.1975
희석 공기		0.649	0.619

4.2. 축대칭 해석 결과

축대칭 해석에서는 축대칭 조건을 주고 스윙 각을 45°와 60° 두 가지 조건을 가지고 계산을 수행하였다. 스윙에 대한 내부 유동에 큰 차이가 보이지 않으므로, 45°에 관한 결과만을 그림 4에 나타내었다. 유선에서 보듯이 스윙에 의한 재순환 영역은 노즐 출구에서 발생되어 공기와 연료의 상호작용으로 인해서 대칭 축을 중심으로 2차 재순환 영역이 생성됨을 관찰 할 수 있다. 재순환 영역의 생성은 연료와 공기가 빠르게 섞이게 하는 역할과 화염을 안정화 시키는 역할을 한다.

연소기 출구의 속도 유선은 희석 공기에 의해 안정화 되어 터빈 입구에서의 불안정 요소를 제거하고 있음을 관찰할 수 있다.

천연가스의 성분변화에 따른 연소 유동장의 차이는 크지 않았으나, 평균 연소 온도만이 열량 값에 따라서 약 10°C 정도의 차이를 보였다.

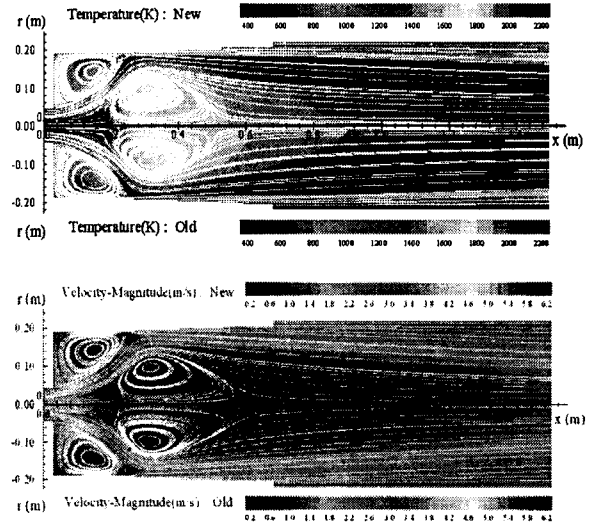


Fig. 4 온도와 속도 및 유선 분포 (2D)

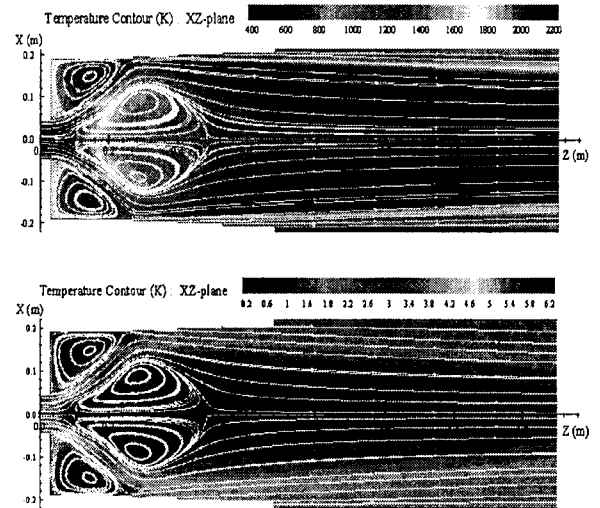


Fig. 5 온도와 속도 및 유선 분포 (3D)

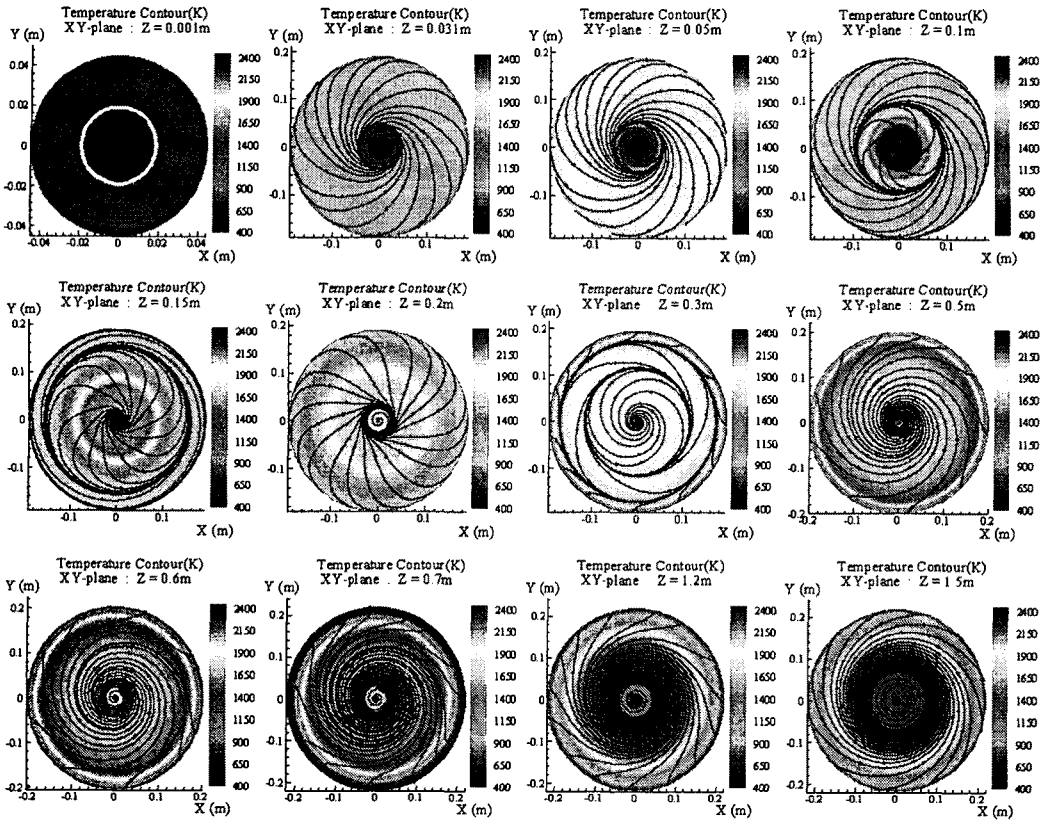


Fig. 6 반경방향 온도 분포와 유선

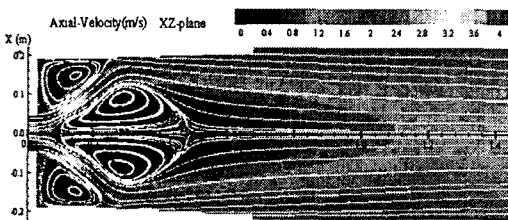


Fig. 7 축 방향 속도와 유선 분포 (XZ평면)

Table 2 . 연소기 출구 평균온도

	2D	3D
T_{out}	1486.5 K	1482.1 K

4.3. 삼차원 해석 결과

스윙 유동의 축대칭 해석에서 약 20,000개의 계산 격자를 이용한 반면 이를 이용한 삼차원 해석에서는 약 880,000개의 격자가 필요하였다. 삼차원 해석 결과를 그림 5와 6에 도시하였다. 삼차원 해석에서는 축대칭 해석에 비하여 연료와 공기의 축 방향 속도가 작게 나타나며, 2차 재순환 영역이 노즐에 가깝게 형성되는 경향을 보였다. 그림 7과 8은 축 방향 속도와 재순환 영역의 관계를 잘 보여주고 있다. 즉 축 방향 속도가 positive에서 negative로 변화는 stagnation 영역에서 재순환 영역이 형성되고 있음을 알 수 있다. 특히 그림 8을 보면 3차원 적으로 재순환 영역의 형성이 축 방향 속도에 지배적이라는 것을 확인 할 수 있다. 2차원 해석 결과와 비하여 연료와 1차 공기 및 2차 공기와 의 혼합의 정도가 회전 유동에 의하여 상당히 영향을 받고 있음을 알 수 있었으며, 연소기 출구의 평균온도가 2차원 해석에 비하여 약간 낮게 예측되었다.

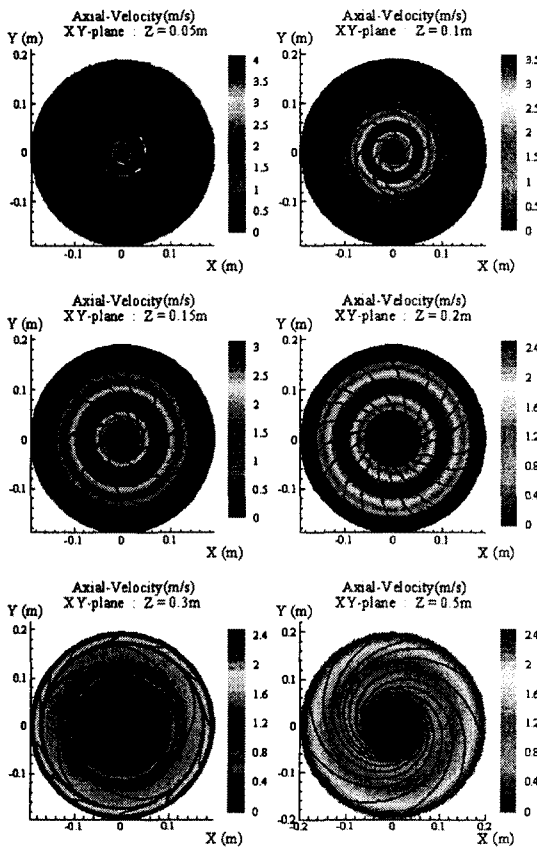


Fig. 8 축 방향 속도와 유선 분포 (XY평면)

5. 결론

본 연구에서는 두 개의 서로 다른 조성을 가지는 LNG 연료를 이용하는 가스터빈 스윙 연소기의 연소 유동을 파악하기 위한 이차원 및 삼차원 전산 유체 해석을 수행하였다. 해석의 결과로써, 연료 조성이 연소기 출구 온도에 미치는 영향을 파악하였으며, 이차원과 삼차원 해석

결과를 비교함으로써, 스윙에 의한 재순환 영역의 생성 및 연료/공기 혼합과 화염 안정화 기구를 확인할 수 있었다.

후기

본 연구는 한국 전력연구원의 자문과제로 수행된 결과이며 지원에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] 홍용식 "가스터빈의 기초이론", 청문각, 1998.
- [2] Hill, P. G., Peterson, C.R., "Mechanics and Thermodynamics of Propulsion", Second Edition Addison-Wesley Publishing Co.
- [3] Mattingly, J. D., "Elements of Gas Turbine Propulsion", McGraw-Hill.
- [4] Turns, S. R., "An Introduction to Combustion", McGraw-Hill, 1999.
- [5] Fluent 6.1 User's Guide Volume I, II, III.
- [6] McBride, B. J. and Gordon, S., "Computer Program for Calculation of Complex Chemical Equilibrium Compositions and Applications" NASA Reference Publication 1311.
- [7] McBride, B. J. and Gordon, S., "Computer Program for Calculating and Fitting Thermodynamic Functions", NASA Reference Publication 1271.
- [8] Wegner, B. and Maltsev, A., "Assessment of unsteady RANS in prediction swirl flow instability based on LES and experiments", 2004 International Journal of Heat and Fluid Flow 25, pp. 528-536.
- [9] Zhao, Q.W., Chan, C. K., Zhao, H.F. "Numerical simulation of open swirl-stabilized premixed combustion", Fuel 83(2004) pp. 1615-1623.