격자크기에 따른 Gun식 가스버너의 스윙유통에 대한 난류모델평가 Evaluation of Turbulent Models on the Swirling Flow of a Gun-Type Gas Burner According to the Mesh Size

김장권*† · 오석형**

Jang-Kweon Kim*† and Seok-Hyung Oh**

(접수일 : 2014년 03월 02일, 수정일 : 2014년 05월 09일, 채택확정 : 2014년 05월 14일)

Abstract: The computational fluid dynamics was carried out to evaluate turbulent models on the swirling flow of a gun-type gas burner(GTGB) according to the mesh size. The commercial SC/Tetra software was used for a steady-state, incompressible and three-dimensional numerical analysis. In consequence, the velocity magnitude from the exit of a GTGB and the flowrate predicted by the turbulent models of MP $k-\epsilon$, Realizable $k-\epsilon$ and RNG $k-\epsilon$ agree with the results measured by an experiment very well. Moreover, the turbulent kinetic energy predicted by the turbulent model of standard $k-\epsilon$ with mesh type C only agrees with the experimental result very well along the radial distance. On the other hand, the detailed prediction of the information of swirling flow field near the exit of a GTGB at least needs a CFD analysis using a fairly large-sized mesh such as a mesh type C.

Key Words : Computational Fluid Dynamics(CFD), Gun-Type Gas Burner(GTGB), Slit, Steady-State, Swirling Flow, Swirl Vane, Turbulent Models, X-Type Hot-Wire Probe(X-Probe)

1. 서 론

각종 형상을 갖는 난류모델들에 전산유동해석을 적용하면서 연구자들이 느끼는 가장 큰 고민은 격자크기라 할 수 있다. 일반적인 정상상태의 난류유동해석에서 단순히 유동경향을 파악하는 수준이라면, 사용하고자 하는 전산해석 프로그램에서 요구하는 무차원 벽거리(y^+)의 크기에 맞추어 고체(solid)인 벽(wall)의 격자크기를 결정하면 무난하다. 그러나 실험값과 정확히 비교하거나 또는 해석하고자 하는 유동모델의 속도기울기가 급

격히 변하는 경우에는 그 내부공간에 대해서도 보다 세밀하게 쪼개어 격자크기를 가져야 한다.

본 연구에서는 대부분의 가스터빈이나 산업용 보일러 및 업소용 난방기 등에서 널리 채택되고 있는 Gun식 가스버너(이하 GTGB라고 함)⁽¹⁻³⁾의 스윙유통(swirling flow)을 비압축성 3차원 정상상태에서 전산유체역학(이하 CFD라 함)으로 해석하는데 있어, 격자크기의 영향 및 실험값들에 대한 난류모델들의 정확성을 평가하고자 한다. 그동안 스윙유통을 동반하는 GTGB의 난류유동에 대한 연구는 열선풍속계로 저자들⁽¹⁻³⁾에 의해 주로 측정

*† 김장권(교신저자) : 군산대학교 동력기계시스템공학과
E-mail : flowkim@kunsan.ac.kr, Tel : 063-469-1848

** 오석형 : 군산대학교 기계공학부

*† Jang-Kweon Kim(corresponding author) : Department of Power System Engineering, Kunsan National University.
E-mail : flowkim@kunsan.ac.kr, Tel : 063-469-1848

** Seok-Hyung Oh : School of Mechanical Engineering, Kunsan National University.

분석되었으나 지금까지 이론적으로 검토된 바가 없다.

Fig. 1 Configuration of a GTGB

따라서 본 연구에서는 기 측정된 실험결과들¹⁻³⁾을 바탕으로 GTGB의 스윙유동에 대한 난류유동구조를 SC/Tetra(ver.8)⁴⁾를 이용한 CFD 해석으로 면밀히 검토하고자 Standard(이하 STN이라고 함) k-ε과 수정된 난류모델들⁴⁾인 MP k-ε, Realizable(이하 RLZ라고 함) k-ε, RNG k-ε 및 SST k-ω등 5가지 난류모델들을 사용하였다.

2. 수치해석

2.1 해석모델

Fig. 1은 본 연구의 수치해석에 사용한 GTGB의 기하학적 상세구조를 나타낸다. 이것은 난방능력 15,000 kcal/hr의 업소용 가스난방기에 적용하고자 개발한 버너이다. 본 가스버너는 원형관 출구 선단에 45° 경사진 원추(cone)형의 배플판(baffle plate)과 배플판 외주에 45° 간격으로 배치된 8개의 공기분출 슬릿(slits)들로 구성되어 있다. 또 이 배플판은 중심에서 직경 25 mm까지는 막혀 있으며, 그 이후 직경 57.8 mm까지는 스윙베인 8개가 45° 간격으로 배치되어 있다. 본 연구에서는 화염 봉(flame rod)과 점화장치(igniter)를 제거하고 구멍을 메운 후, 실험과 해석을 각각 수행하였다.

Fig. 2는 Fig. 1의 GTGB를 외란이 없는 정상 상태인 3차원 직교좌표 공간에 배치하고자 모델화한 그림이다. 여기서 GTGB의 스윙유동을 3차

원 비압축성 정상상태로 해석하고자 GTGB를 감싼 덕트 직경은 충분한 공간을 두기 위해 버너 직경의 10배로 하였으며, 덕트 길이는 1000 mm를 적용하였다. 또 GTGB의 길이는 편의상 70 mm로 적용하였다.

Fig. 3은 CFD로 해석하기 위해 Fig. 2를 격자크기가 다르게 만든 3가지 형상을 보여주고 있다. 본 해석모델은 CATIA(V5R18)로 3차원형상을 모델링하여 "stl" 파일로 출력한 후, 이것을 유한체적법에 기초한 상용소프트웨어인 SC/Tetra의 전처리 소프트웨어로 불러들여 경계조건들을 부여하고 모델파일을 만든 다음, 격자크기를 제어할 수 있는 "Octree" 기능으로 3가지 격자파일을 만들었다. 본 연구에서 사용한 기본 격자는 4면체와 피라미드를 조합한 비정형격자(unstructured mesh)기법으로 만들어졌으며, 좁은 틈새인 슬릿 및 스윙

Fig. 2 Analysis model of a GTGB

Table 1 Comparison of mesh size

Mesh	Number of nodes	Number of elements
Type A	6,303,108	32,359,756
Type B	7,893,202	41,604,886
Type C	9,915,236	52,928,218

Fig. 3 Mesh configuration of a GTGB

베인을 정확히 해석 가능하도록 Octree 크기 수준을 약 0.17 mm까지 세밀하게 적용한 결과 각각의 격자모델들에 대한 기본 교점(node) 수와 요소(element) 수들은 Table 1과 같이 생성되었다. 이때, 해의 수렴성을 높이기 위해 유체와 접하는 버너경계벽면에는 2개의 프리즘층(prism layer)을 삽입하였다.

2.2 수치기법

본 연구에서 적용한 해석모델들의 경계조건들을 살펴보면, Fig. 2의 가스버너로부터 공기가 분출할 때 Entrainment 효과를 나타내는 공동흐름벽면(co-flowing wall)은 속도가 0 m/s이고 정압이 0 Pa인 대기압으로 적용하였으며, 가스버너를 둘러싼 주변벽면(ambient wall)은 Free-slip으로 적용하였다. 또 버너 입구벽면(inlet wall)은 기 발포된 연구들¹⁻³⁾에서 실험에 사용한 정압으로 164 Pa를 적용하였다. 또 실제 버너 입구로 들어오는 공기는 대부분 송풍기를 통해 공급되므로 난류가 완전히 발달되었다고 가정하고, 버너입구에서 적용한 난류운동에너지(k)와 난류소산율(ϵ)은 각각 식 (1)과 식 (2)를 사용하였다⁴⁾.

$$k = 1.5(U \cdot TI)^2 \quad (1)$$

$$\epsilon = \frac{C_\mu^{\frac{3}{4}} \cdot k^{\frac{3}{2}}}{0.07D} \quad (2)$$

여기서 U 는 가스버너의 입구측 평균속도이며, TI 는 난류강도로 본 연구에서는 10%를 적용하였다. 또 상수 C_μ 는 0.09이며, D 는 버너 입구직경이다. 따라서 본 연구에서는 버너 입구벽면에 $k = 0.037 \text{ m}^2/\text{s}^2$, $\epsilon = 0.2142 \text{ m}^2/\text{s}^3$ 를 적용하였다. 또 고체인 가스버너 몸체는 점착조건(no-slip)을 적용하였으며, 해석모델의 출구는 정압이 0 Pa인 대기압으로 정하였다.

한편, 해의 제어를 위해 운동량 및 난류모델방정식들의 대류항들은 모두 2차 풍상기법(upwind scheme)으로 이산화 하였으며, 확산항들은 초기상태인 Accuracy weighted 기법을 적용하였다⁴⁾. 또한 압력보정방법은 SIMPLEC 알고리즘을 사용하였으며, 압력항 및 모든 변수들의 완화계수는 초기상태의 값들을 사용하였다. 그리고 해의 수렴조건은 모든 변수들의 잔류값이 1.0×10^{-5} 일 때로 설정하였다.

3. 해석결과 및 고찰

3.1 평균속도 분포

Table 2~4는 가스버너 슬릿부 출구($Z=0$ mm)와 $Z=5$ mm의 X-Y평면상에서 Fig. 3의 3가지 격자모델들에 대해 난류모델별로 얻어진 평균속도(V)의 최대크기와 난류운동에너지의 최대크기 및 풍량(Q)과 무차원 벽거리(y^+)를 각각 비교한표이다. 여기서 실험값으로 제시된 $Z=0$ mm의 평균속도값은 피토판으로 측정한 결과이며, $Z=5$ mm에서

의 평균속도값과 난류운동에너지값들은 열선풍속계를 X형 열선프로브(이하 X-probe라 함)로 사용한 결과들이다. 또 풍량은 웬테스터로 측정한 결과¹⁻³⁾이다.

Table 2~4에서 계산된 y^+ 의 최대값들은 20미만으로 나타나 고체인 가스버너 몸체의 격자가 세밀하게 이루어졌음을 확인할 수 있다. 참고로 SC/Tetra에서는 $y^+ \geq 11.6$ 이면, 식 (3)을, 그리고 $y^+ \leq 11.6$ 이면, 식 (4)를 따른다⁴⁾.

Table 2 Comparison of results obtained near the slit of a GTGB (Mesh type A)

Items		Estimation results					
		Z(mm)	V(m/s)	k(m²/s²)	Q(ℓ /min)	y _{min} ⁺	y _{max} ⁺
Analysis (Turbulent models)	STN k-ε	0	15.5141	11.9807	459.31	0.0251	16.7723
		5	12.0367	6.3101			
	MP k-ε	0	16.3135	9.6560	452.89	0.0756	16.9984
		5	13.2275	5.6542			
	RLZ k-ε	0	16.4190	9.3090	446.78	0.0497	16.8059
		5	13.3384	8.7073			
	RNG k-ε	0	16.2709	9.9985	452.93	0.0488	17.0236
		5	13.1832	4.3612			
	SST k-ω	0	16.0790	6.8324	454.83	0.0175	18.2139
		5	13.1408	4.6639			
Experiment(X-probe)		0	16.36	-	450	-	-
		5	13.735	7.1485			

Table 3 Comparison of results obtained near the slit of a GTGB (Mesh type B)

Items		Estimation results					
		Z(mm)	V(m/s)	k(m²/s²)	Q(ℓ /min)	y _{min} ⁺	y _{max} ⁺
Analysis (Turbulent models)	STN k-ε	0	15.4928	12.0827	458.46	0.0742	7.4587
		5	12.9436	7.8666			
	MP k-ε	0	16.3458	9.7497	452.09	0.0593	7.7894
		5	14.2670	5.9603			
	RLZ k-ε	0	16.6105	8.9803	449.78	0.0516	7.8534
		5	14.4152	11.2944			
	RNG k-ε	0	16.3510	10.1977	452.03	0.0903	7.7199
		5	14.1967	5.4186			
	SST k-ω	0	16.0521	7.6497	454.12	0.0529	9.1068
		5	14.3304	4.9282			
Experiment(X-probe)		0	16.36	-	450	-	-
		5	13.735	7.1485			

Table 4 Comparison of results obtained near the slit of a GTGB (Mesh type C)

Items		Estimation results					
		Z(mm)	V(m/s)	k(m²/s²)	Q(ℓ /min)	y _{min} ⁺	y _{max} ⁺
Analysis (Turbulent models)	STN k-ε	0	15.4134	11.9916	458.66	0.0149	17.3544
		5	12.9009	7.9711			
	MP k-ε	0	16.3488	9.9797	452.66	0.0133	17.3374
		5	14.2726	6.0199			
	RLZ k-ε	0	16.4253	9.8142	448.23	0.0157	16.8768
		5	14.3489	9.8516			
	RNG k-ε	0	16.3459	10.4236	452.62	0.0117	17.3659
		5	14.2003	5.5208			
	SST k-ω	0	16.0690	7.3501	454.42	0.0066	14.3159
		5	14.3309	5.0048			
Experiment(X-probe)		0	16.36	-	450	-	-
		5	13.735	7.1485			

$$\frac{u}{u_*} = 2.5 \ln \left(\frac{u_* y}{\nu} \right) + 5.5 \quad (3) \quad V = \sqrt{V_z^2 + V_x^2 + V_y^2} \quad (5)$$

$$\frac{u}{u_*} = \frac{u_* y}{\nu} \quad (4)$$

여기서 u 는 수직거리 y 에서의 유동속도이며, u^* 는 마찰속도, 그리고 ν 는 동점성계수이다.

일반적으로 STN k-ε 난류모델은 스월을 동반하는 연소기에서 큰 축방향의 속도기울기나 접선방향의 속도기울기를 과소 예측하는 문제점⁵⁾이 있다고 알려져 있는데, Table 2~4에서도 STN k-ε 난류모델이 다른 모델들에 비해 속도크기를 가장 작게 예측하는 반면, 풍량은 가장 크게 예측해 오차가 가장 큼을 알 수 있다. 대체적으로 버너출구에서의 평균속도크기 및 풍량 측면에서 볼 때 MP k-ε, RLZ k-ε 및 RNG k-ε이 비교적 실험결과와 근접하게 예측함을 알 수 있다. 다만, 풍량은 MP k-ε과 RNG k-ε 난류모델들이 매우 작지만 과대 예측하고, RLZ k-ε 난류모델은 매우 작지만 과소 예측하는 경향이 있다.

Fig. 4는 GTGB의 출구로부터 Z=5 mm 떨어진 중심축상에서 반경방향(Fig. 1의 X방향)에 따라 난류모델들에 의해 예측한 평균속도의 크기와 실험값들을 동시에 나타내고 있다. 여기서 실험에 의한 평균속도크기는 식 (5)로 정의하였다.

참고로 V_z , V_x , V_y 는 각각 Z방향, X방향, Y방향의 평균속도성분들이다. 한편, 3가지 격자크기 모델 모두 슬릿부에서 가장 큰 속도분포를 보이고, 슬릿부 안쪽에서는 경사진 스월베인에 의한 회전유동의 영향으로 원심력이 작용하여 버너중심부에서 가장 작은 속도크기 분포를 보여주고 있다. 격자크기가 가장 작은 격자형태 A의 경우, 요소 수가 약 3,236만개로 많은데도 불구하고 난류모델들이 예측한 슬릿부에서의 피크(peak) 속도크기와 스월베인 외측에서 형성되는 속도크기는 모두 실험값에 미치지 못함을 알 수 있다. 그러나 격자크기가 증가함에 따라 난류모델들이 예측한 슬릿부 및 스월베인 외측에서 형성되는 속도크기들은 실험값과 잘 일치하며, 특히 요소 수가 약 4,160만개인 격자형태 B부터는 슬릿부와 스월베인 사이의 좁은 공간에서 실험으로는 알 수 없었던 상세한 속도기울기 및 분포양상을 정확히 보여줄 수 있다. 또 경사진 스월베인 내측에서 형성된 실험에 의한 속도크기가 예측값들보다 다소 크게 나타난 이유는 속도의 방향성, 즉 음(-)속도를 정확히 계측해내지 못하는 X-probe의 한계로 인해 발생한 결과로 사료된다.

Fig. 4 Mean velocity magnitude profiles along the radial distance at Z=5 mm

Fig. 5 Turbulent kinetic energy profiles along the radial distance at Z=5 mm

3.2 난류운동에너지 분포

Fig. 5는 GTGB의 출구로부터 Z=5 mm 떨어진 중심축상에서 반경방향에 따라 난류모델별로 예측한 난류운동에너지의 크기를 나타내고 있다. 여기서 실험값은 난류가 등방성(homogeneous)이라고 가정한 식 (6)으로 정의하였다.

$$k = \frac{1}{2} (v_z^2 + v_x^2 + v_y^2) \quad (6)$$

참고로 v_z, v_x, v_y 는 각각 Z방향, X방향, Y방향의 변동속도성분의 RMS(root-mean-square)값들이다.

Fig. 5에서 난류운동에너지의 크기분포는 STN

k- ϵ 난류모델만이 특히 요소 수가 약 5,293만개인 격자형태 C에서 슬릿부 및 버너 내에서 전체적으로 실험값 분포와 가장 잘 일치하고 있다. 다만 좌우 슬릿부에서 예측된 k 값들이 다소 차이를 보이는 것은 해의 수렴조건을 더 낮추게 되면 해소될 것으로 사료된다. 난류모델들에 의해 예측된 슬릿부에서의 k 값은 격자형태 A의 경우 실험값들에 현저히 미치지 못하나, 격자형태 B부터는 STN k- ϵ 난류모델만이 양호한 예측을 보여주고 있다. 한편 수정된 난류모델들이 예측한 k 값의 피크값은 반경방향으로 확산되지 못하고 슬릿부 안에서 나타나 STN k- ϵ 난류모델보다는 전혀 다른 모습을 보여주고 있다.

4. 결 론

GTGB의 스윙유동을 비압축성 3차원 정상상태에서 격자크기별로 CFD 해석한 결과들은 다음과 같다.

- (1). 가스버너의 출구에서 평균속도크기와 풍량은 MP k- ϵ , RLZ k- ϵ 및 RNG k- ϵ 의 난류모델들이 예측한 결과가 실험값과 가장 잘 일치한다.
- (2). 난류운동에너지는 격자형태 C에서 STN k- ϵ 난류모델만이 전체적으로 실험값 분포와 잘 일치한다.
- (3). 실험만으로는 부족했던 GTGB의 출구근처에서 스윙유동장의 정보를 정확히 예측하기 위해서는 계산시간이 크게 증가하는 폐단이 있지만, 적어도 격자형태 C와 같이 격자수가 매우 큰 CFD 해석이 필요하다.

후 기

이 논문은 2013학년도 군산대학교 대학자체 학술공모과제 연구비 지원에 의하여 연구되었음.

Reference

1. J. K. Kim, 2009, "Investigation on the Turbulent Swirling Flow Field within the Combustion

- Chamber of a Gun-Type Gas Burner", Trans. of the KSME(B), Vol. 33, No. 9, pp. 666-673.
2. J. K. Kim and K. J. Jeong, 2006, "Investigation on the Turbulent Flow Field Characteristics of a Gun-Type Gas Burner with and without a Duct", J. of the KSPSE, Vol. 10, No. 4, pp. 17-24.
3. J. K. Kim and K. J. Jeong, 2006, "Measurement of the Three-Dimensional Flow Fields of a Gun-Type Gas Burner Using Triple Hot-Wire Probe", J. of the KSPSE, Vol. 10, No. 3, pp. 23-31.
4. SC/Tetra(Version 8), 2010, User's Guide, Software Cradle Co., Ltd.
5. H. L. Relation, J. L. Battaglioli and W. F. Ng, 1998, "Numerical Simulations of Nonreacting Flows for Industrial Gas Turbine Combustor Geometries", Trans. of the ASME (J. of Eng. for Gas Turbines and Power), Vol. 120, pp. 460-467.