

LES 모델을 적용한 Bluff-body 주위의 예혼합 연소 해석

정의만* · 구자예**

The Simulation of LES Model For Premixed Combustion around A Bluff Body

Eui-Man Jung* · Ja-Yeo Ku**

ABSTRACT

This paper present result of numerical simulation of premixed combustion around a triangle Bluff Body. And a numerical simulation of a premixed flame stabilization by a bluff body was performed using LES Model. The calculated results from the LES showed a good agreement with experiment data than $k-\epsilon$ model. Premixture combustion has flammability limit, quenching distance, smallest ignition energy has the combustion quality of the back. Bluff body makes a recirculation zone. Therefor velocity of behind bluff body is very slow. It was caused by slowly position speed and the fire occurred after the Bluff Body. Occurrence of fire it made the waste gas of high speed and the thrust made well.

Key Words: Flame Holder (화염 안정기), Combustion Model (연소 모델), Premixed Combustion (예혼합 연소), Large Eddy Simulation (LES 모델)

기 호 설 명

c	Reaction progress variable	U_l	Laminar flame speed (m/s)
Sc_t	Turbulent Schmidt number for the gradient turbulent flux	α	Molecular heat transfer coefficient of unburnt mixture(thermal diffusivity)
S_c	Reaction progress source term	ℓ_t	Turbulence length scale (m)
n	Number of products	τ_t	Turbulence time scale (s)
Y_i	Mass fraction of species i	τ_c	Chemical time scale (s)
$T_{i,ad}$	Mass fraction of species i after complete adiabatic combustion	t_1	Characteristic flame time scale
ρ_u	Density of unburnt mixture	t_η	Smallest (Kolmogorov) turbulence time scale
U_t	Turbulent flame speed	v_η	Kolmogorov velocity
A	Model constant	ν	Kinematic viscosity
u'	RMS (root-mean-square) velocity (m/s)	Sc	Normalized average rate of product formation
		H_{cmb}	Heat of combustion for burning 1 kg of fuel (J/kg)
		Y_{fuel}	Fuel mass fraction of unburnt mixture

* 학생회원, 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부

** 정회원, 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부

E-mail : jyKoo@kau.ac.kr

TEL : (02)300-0116

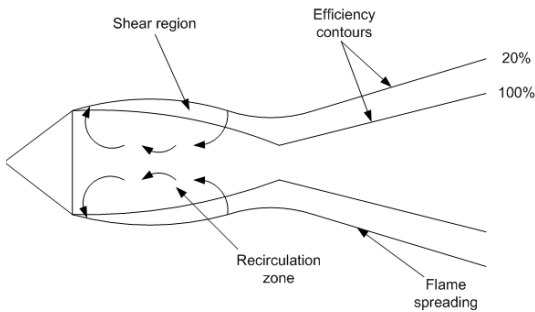


Fig. 1 Bluff Body 후류에 대한 유동

1. 서 론

가스터빈엔진에서 효율적인 연소기를 설계하는 방법으로 연소기내로 유입되는 공기 유로의 확대를 이용하여 공기 속도를 가능한 낮추면 혼합기의 체류 시간(residence time)이 길게 되어 연소 효율을 높일 수 있다. 하지만 높은 고도에서 빠른 속도로 비행하는 항공기의 경우 유로의 확대만으로 체류시간(residence time)을 길게 하더라도 효율적인 연소가 이루어지게 하기는 힘들다. 이는 연소실 내로 유입되는 유동의 속도가 화염의 전파 속도보다 크기 때문에 화염이 유지되기 힘들기 때문이다. 이러한 경우 연속적으로 화염을 유지하기 위해 화염을 안정화하여 문제를 해결 할 수 있다.

화염을 안정화하는 방법으로는 Fig. 1에서 보는 것과 같이 Bluff body를 이용하여 스윙(Swirl)을 만들어서 체류시간을 길게 하는 것이다. 때문에 유동의 속도는 화염 전파 속도보다 낮아져 연속적인 연소를 하는데 무리가 없어진다. Bluff body는 보통 화염 안정기라고 불리고 여기서 말하는 화염 안정기란 가스의 속도와 화염의 속도가 같아지는 것을 말한다.

안정된 화염에 유동의 속도를 증가시키게 되면 연료의 유량이 증가함에 따라 화염 면에 구멍이 생기기 시작하고 좀 더 증가시키게 되면 화염은 버너에서 약간 떨어진 부분에 안정화 되어 진다. 이러한 상태를 부상(Lift off)라고 한

다. 부상현상 이후에 연료의 유량을 더욱 증가시켜 매우 큰 유량이 되면 화염이 꺼지게 되는데 이때 Blowout되었다고 한다. 하지만 반대로 가스의 속도가 화염의 속도보다 느릴 때는 역화(flash back)현상이 일어날 수 있다. 이러한 상태가 되는 것을 방지하고 연속적인 화염을 유지하기 위해서 재순환영역을 만들어 난류유동을 발생시켜 화염을 안정화시켜야 한다.

화염 안정기는 크게 두 가지 역할을 하는데 후기연소기(after burner)에서는 단지 화염의 안정화를 위한 기능만 하지만 주연소실(Main Combustor)에서는 화염 안정화뿐만 아니라 고열을 방출하는 지역을 제공하기 위해 사용된다. 이렇게 설계하기 위해 Bluff Body를 설계하여 후방에 난류 유동을 만들어 빠른 유동에서도 화염이 꺼지지 않고 지속적으로 연소가 되게 할 수 있도록 하는 것이다.

본 연구에서는 연료-공기의 혼합기가 들어오는 곳에 bluff body를 설정하여 후류에 설정된 재순환영역을 확인하고 재순환 영역의 길이, 난류 특성, 위치에 따른 온도와 속도분포 등을 측정하였다. 또 재순환 영역에 연소시킴으로써 연소에 대한 수치 해석적 연구를 하였다.

2. 이 론

2.1 난류모델

난류 유동 및 화염에 대한 수치접근법은 크게 모델링 없이 직접 수치 해를 구하는 DNS(Direct Numerical Simulation), 평균화된 난류유동에 대한 모델링을 통해 접근하는 RANS(Reynolds Averaged Navier-Stokes) 그리고 이들 방법을 절충한 LES(Large Eddy Simulation)로 구분된다.

이들 중 LES의 기본 개념은 대부분의 에너지를 포함하고 난류수송의 역할을 담당하는 큰 에디(Eddy)는 모델 없이 직접 계산하고, 비교적 등방성의 성격을 갖는 작은 스케일의 에디는 이격작(Subgrid) 모델로 처리하게 된다. 따라서 LES는 모든 스케일의 유동구조에 영향을 주는

RANS에서의 난류모형보다는 좀 더 일반적이고, 형상과 경계조건에 덜 의존한다고 할 수 있다. 또한 시간 평균화된 물리량을 이용하여 난류현상을 묘사하는 RANS와는 다르게 LES는 유동의 비정상 효과는 물론 연소장에서 화염 불안정성 및 소음 등의 현상을 해석할 수 있는 매우 유용한 접근 방법이다.

LES에서는 순간적인 유동변수는 GS(Grid Scale) 성분(\bar{f})과 SGS(Sub-Grid Scale) 성분(f')로 나누어진다. 이때 GS 성분은 Favre 여과($\bar{f} = \overline{\rho f / \rho}$)에 의해 결정되어지며, 'over-bar' 첨자는 공간여과(Spatial filter)를 의미한다. 이에 대한 표현은 식(1)과 같다.

$$\bar{f}(x) = \int_D f(x') G(x, x') dx' \quad (1)$$

여기서 G는 확률 밀도함수(Probability density function)의 의미를 갖는 여과(Filter) 함수이며, 전 계산영역에 대해 적분되어진다. 여과함수는 격자의 평균효과를 갖는 Box filter가 사용되었다. 이와 같은 여과과정을 3차원 비정상압축성 Navier-Stokes 방정식에 적용하면 다음과 같은 LES 방정식으로 표현된다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \bar{u}_i) = 0$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \bar{u}_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \bar{u}_i \bar{u}_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} (\mu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j}) - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (2)$$

여기서 τ_{ij} 는 SGS(Subgrid-scale stress) 응력텐서를 의미하며,

$$\tau_{ij} = \overline{\rho u_i u_j} - \overline{\rho} \overline{u_i u_j} \quad (3)$$

로 표현할 수 있다.

위 식(1),(2),(3)은 본문의 수치해석에 기본적인 식으로 상용코드인 Fluent에서 사용하는 LES방정식이다.

2.2. 예혼합 연소 모델

연료와 산화제의 초기 혼합특성으로부터 화염을 분류하면 예혼합 화염과 확산화염으로 구분된다. 확산화염은 연료와 산화제가 초기에 분리되어 있으며 화염지역에서 연료와 산화제의 혼합에 의해 발열반응이 나타난다. 확산화염은 연

료와 산화제의 혼합특성상 매연의 발생이 많아 초기 전열단계에서 복사열전달을 주로 이용하는 대형 보일러 등에서 효과적이다. 특히 예혼합 화염에서의 여러 가지 안전성 문제로 인해 실제 대부분의 산업용 연소 기기에서는 확산화염이 널리 이용되고 있는 실정이다.

하지만 예혼합 화염은 연료와 산화제가 화염이 형성되기 전에 잘 혼합되어 있으며 일단 화염이 형성되면 전파되려는 특성을 갖는다. 이러한 특성으로 인해 예혼합 연소에 관한 연구가 많이 진행되어지고 있다.

이러한 예혼합 연소는 가연한계(flammability limit), 소염거리(quenching distance), 최소점화 에너지(minimum ignition energy) 등의 연소 특성을 갖는다. 이러한 예혼합 연소는 화염안정성과 관련하여 역화(flashback), 화염부상(liftoff), 화염날림(blowout) 현상 등이 나타나며, 실제 연소기에서는 다양한 보염기(flame holder)가 있어 화염을 안정화시킨다.

예혼합기를 연소에 있어서 전파속도에 따라 분류하면 아음속 연소파(deflagration)와 초음속 연소파(detonation wave)로 구분된다. 아음속 연소파는 음속보다 느린 속도로 전파되는 경우이고 초음속 연소파는 약 1 ~ 10km/s 로서 음속보다 빠른 경우인데 폭약류를 제외하고는 이러한 파의 발생을 억제하여 피해를 방지하여야 한다. [2]

예혼합 화염은 연료와 산화제가 분자 수준에서 잘 혼합되어 있는 경우에 점화되면 아음속 연소파(deflagration)의 형태로 전파된다. 이러한 형태의 화염은 실용적인 연소기에 널리 적용되고 있는데. 예를 들어 가정용 스토브, 가스레인지, 가솔린기관, 가스터빈 등에서 널리 이용되고 있다. 예혼합화염의 가장 기본적인 화염 특성은 층류연소속도(lamina burning velocity)로서 일반적으로 차가운 전류지역으로의 전파속도를 나타낸다. 이는 주어진 연료/산화제 혼합기에서 열손실이 없는 경우의 층류 일차원, 평면 화염의 전파속도로 정의 되며, 예혼합기의 반응성, 발열성 등을 표시한다.

일반적인 탄화수소/공기 혼합기의 경우 당량비 $\phi = 1.1$ 부근에서 층류연소 속도가 최대값을 가지며 대체로 0.45m/s 정도이다. 예외적으로 아세틸렌의 경우에는 1.5m/s ($\phi = 1.4$)의 매우 큰 값을 갖는다. 수소/공기의 경우에는 3.2m/s정도($\phi = 1.8$)이다. 층류 연소속도는 예혼합 화염의 경우, 연료와 산화제가 분자수준에서 잘 혼합되어 있기 때문에 연료의 반응을, 발열성 등이 화염의 전파속도를 제어하는 주된 메커니즘이다. 또한 반응에 의해 생성된 열이 전류 축으로 얼마나 빨리 열확산 되는가의 정도가 화염전파 속도에 영향을 미친다. 따라서 화염전파 속도는 식(4)의 특성을 가진다.

$$S_L^o \propto \frac{1}{\rho_o} \sqrt{\frac{\lambda}{c_p}} \exp\left(-\frac{E_a}{2R^o T_f}\right) \quad (4)$$

여기서 ρ_o 는 전류의 밀도, λ 는 열전도도, C_p 는 정압비열, E_a 는 연료의 활성화 에너지, R_0 는 일반 기체상수이며, T_f 는 화염온도를 나타낸다.

화염온도는 초기온도와 연료의 발열성에 의해 결정되고, 활성화 에너지가 일반적인 탄화수소 연료의 경우 약 40kcal/mol 이므로 $R_0 = 1.987\text{kcal/mol}\cdot\text{K}$ 에 의해 활성화 온도 $T_a = E_a/R_0$ 는 약 2000K로서 화염온도 T_f 가 1500~ 2500 K이므로 지수함수 항에서 화염온도에 의해 화염 전파속도가 매우 민감하게 영향을 받는다.

예혼합 화염의 두께 $\delta_T = \alpha/S_L^o$ 로 표시되는데 일반적인 연소시스템의 경우 약 0.01m/s 정도의 값을 갖는다. 따라서 화염전파속도는 0.1~1m/s의 범위에서 화염두께가 약 0.1~1mm 정도로 예혼합 화염의 두께가 매우 얇으며, 화학반응이 일어나는 지역은 화염두께의 약 0.1mm정도로 매우 얇다.

본 연구에서 사용된 프로판은 일반적인 특성으로 독특한 천연가스 냄새가 나는 무색 가스이다. 극인화성물질이고 환경유해물질이다. 가정용연료나 화학공업용 연료로 사용되는 기본적인

예혼합 연료이다.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho c) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} c) = \nabla \cdot \left(\frac{\mu_t}{Sc_t} \nabla c \right) + \rho S_C$$

$$c = \frac{\sum_{i=1}^n Y_i}{\sum_{i=1}^n Y_{i,ad}} \quad (5)$$

위 식(5)은 프로판-공기 예혼합 연소에서 사용된 수치해석 코드의 식들 중 화염앞부분의 c 의 값에 관한 수송방정식이다. c 의 값이 0일 때에는 아직 연소가 이루어지지 않은 상태에 대한 화염 전파를 나타내는 것이고 c 의 값이 1일 때에는 이미 연소된 상태의 화염 전파를 나타낸다.

$$U_t = A(u')^{3/4} U_l^{1/2} \alpha^{-1/4} \rho_t^{1/4} = Au' \left(\frac{\tau_t}{\tau_c} \right)^{1/4} \quad (6)$$

식(6)은 난류 화염 속도를 나타내는 식으로 난류화염 속도는 화염 면에 직각인 방향으로 화염 영역에 들어가는 미연 혼합기의 속도라고 정의 할 수 있다. 난류화염속도는 혼합기의 특성뿐만 아니라 유동의 특성에도 화염전파속도가 영향을 받기 때문에 유동에 관하여서도 고려하여야 한다.

$$\ell_t = C_D \frac{(u')^3}{\epsilon} \quad (7)$$

난류 길이 크기에 관한 것은 식(7)와 같다.

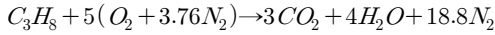
$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho h) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} h) = \nabla \cdot \left(\frac{k+k_t}{c_p} \nabla h \right) + S_{h,chem} + S_{h,rad} \quad (8)$$

식(8)은 이 상용코드에서 예혼합 화염의 온도에 관한 식을 나타낸 것이다. 여기서 $S_{h,rad}$ 은 열에 기인한 열의 손실을 나타내고 $S_{h,chem}$ 은 화학반응에 의한 열을 나타내고 식(9)과 같이 나타낸다.

$$S_{h,chem} = \rho S_c H_{comb} Y_{fuel} \quad (9)$$

2.3 연소 반응 모델

본 논문에서는 예혼합 연소 모델로 프로판과 공기를 혼합한 연료-공기 유체를 연소하여 그 연소한 특성을 알아보았다. 프로판과 공기의 화학 반응식을 살펴보면 다음과 같다.



위의 화학반응을 비가역반응으로 가정하면 무차원 혼합분율 f 는 식(10)으로 나타낸다.

$$f = (\Phi_m - \Phi_{m,ox}) / (\Phi_{m,fu} - \Phi_{m,ox})$$

$$\Phi = +m_{ox} - i \cdot m_{fu} \quad (10)$$

식(11)에서 m_{ox}, m_{fu} 는 각각 산소와 연료의 질량 분율을 나타내고 $\Phi_{m,ox}, \Phi_{m,fu}$ 는 각각 산소, 연료의 유입 구에서의 Φ 값을 나타낸다. i 는 이론 연소/산소비를 나타낸다. 이 f 는 보존 방정식에 따르며, 생성물이 항상 0이 되는 편리한 성질을 가지고 있다.

농도는 다음식과 같이 주어졌다.

$$f_{st} = 1/(1+i)$$

$$T_{st} = (h_{fu}/C_p + T_{fu} + i \cdot T_{ox}) / (1+i) \quad (11)$$

식(11)에서 f_{st} 는 이론비, T_{st} 는 이론비에서 연소할 때의 온도, h_{fu} 는 연료의 엔탈피, C_p 는 혼합기의 비열을 나타낸다.

$$f \leq f_{st} \text{ 일 때}$$

$$m_{ox} = (f_{st} - f) / f_{st}$$

$$T = \{T_{ox}(f_{st} - f) + T_{st}f\} / f_{st} \quad (12)$$

$$f > f_{st} \text{ 일 때}$$

$$m_{ox} = (f - f_{st}) / (1 - f_{st})$$

$$T = \{T_{fu}(f_{st} - f) + T_{st}(1 - f)\} / (1 - f_{st}) \quad (13)$$

식(10), (11)에서 T_{fu}, T_{ox} 는 각각 연료, 산소의 유입온도를 나타낸다.

3. 해석조건

삼각형 모양의 Bluff Body를 설계하여 후류와 그 후류의 연소에 관한 수치 해석적 시도를 하기 위해 연소실의 모양은 $0.12 \times 0.5m$ 의 단면적을 가진 $1m$ 길이의 육면체로 설정하였다(Fig. 2). Bluff Body의 크기는 $40mm$ 의 정삼각형으로 설계하였고 계산 시간을 줄이기 위해 Bluff Body의 일부를 설계하였다. 연소를 해석할 때 점화점(ignition point)으로 설정한 것과 유동이 시작하는 입구의 면적 전체에 점화하는 것이 본문의 해석에 영향을 미치지 않았기 때문에 후자의 것을 이용하였다.

그리고 해석의 시간을 줄이기 위해 2차원으로 해석하였다. 시간에 따른 화염의 변화를 보기 위해 비정상상태로 계산하였고 또 정상상태로 계산하여 보았다. 연소는 입구에 높은 온도($800K$)로 설정하여 화염이 발생하게 하였다.

연소를 위한 연료는 프로판-공기의 예혼합 기체를 이용하였고 이 연료의 물성치는 상용코드의 기본 값으로 설정하여 해석하였다. 수직해석을 위해 입구로 유입되는 예혼합 연소가스의 속도는 $40m/s$ 이고 온도는 $300^\circ C$ ($573K$)이다.

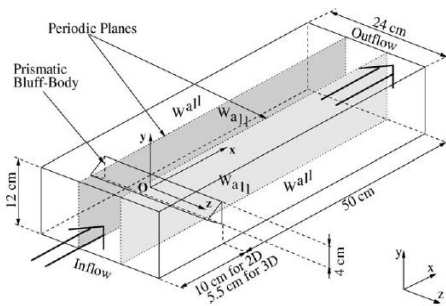


Fig.2 Calculation domain

난류의 의한 농도변동이 있을 경우에 연료와 산소가 만나면 순간적으로 이론비에서 반응하는 대단히 빠른 반응을 고려하여, 연료와 산소는 동일 시각에 동일 장소에 있지 않는다고 하여도 시각이 다르면 각각 단독으로 존재하기 때문에 시간평균치로서 양자가 동일 장소에 공존하게 된다. 이 경우 시간 평균치의 혼합 분율에 대한 f 의 보존식이 성립하기 때문에 여기에 첨가해서 농도 변동의 크기 g 를 구할 필요가 있다. 따라서 f 의 보존식의 해에서 구하고자 하는 전부의 값이 해결되는 것이다. f 와 온도, 산소 및 연료

Bluff Body 후방에 나타나는 난류의 강도에 대한 해석도 하였는데 이 해석에 쓰인 난류 강도에 대한 것은 식(14)에 나타내었다.

4. 수치해석 결과

Fig. 3은 유동이 흐름에 따라 Bluff Body 후방에 생기는 속도형상이다. Bluff Body에 생긴 와류로 Bluff Body 후방에서 속력이 감소하는 것을 확인 할 수 있다. 이로 인해 유동을 체류시키고 따라서 연소 되었을 때 화염을 고정시키는 역할을 하는 것이다. 이러한 재순환 영역의 발생은 난류를 생성하여 화염의 전파 속도를 증가시키는 것과 같은 큰 역할을 한다. 또 Bluff Body의 면에서 멀어 질수록 후방에 발생하는 재순환 영역이 점점 작아져 소멸하고 있는 것을 알 수 있다. 이러한 현상은 와류의 신축성의 영향과 점성에 의한 영향으로 인해 발생한다.

이와 관련하여 Fig. 9 은 두 가지 항목에 대한 계산 값들의 분포를 보여준다. Bluff Body 후방에 나타나는 후류의 축방향의 속도와 수직

$$I = \frac{u'}{u_{avg}} = 0.16(Re_{D_H})^{-1/8} \quad (14)$$

방향의 속도를 나타낸다. 수직방향, 즉 Y방향의 속도는 와류의 패턴에 따라 영향을 받는다. X방향의 속도를 보면 Bluff Body 후방에서 확실히 속도가 줄고 있음을 알 수 있다. 일정 부분에서는 역방향의 속도가 나오는 곳으로 보아 재순환하기 위한 회전 유동이 생긴 것으로 확인 된다. Y축, 즉 수직방향의 속도를 보면 x=15, 30mm 후방에서 최대값을 가지고 있다가 Bluff Body에서 멀어 질수록 소멸 되고 있는 것을 알 수 있다. 이러한 점은 재순환 영역이 생겼다가 다시 소멸하고 있다는 것을 나타낸다.

Fig. 4는 Bluff Body 후방에 나타나는 온도를 보여주며 Fig. 7은 이를 x축 위치별 온도 그래프로 나타낸 것이다. 이미 언급했듯이 Bluff Body로 인한 와류발생으로 재순환 영역이 형성되고 이로 인해 화염온도가 상승하는 것을 알 수 있다.

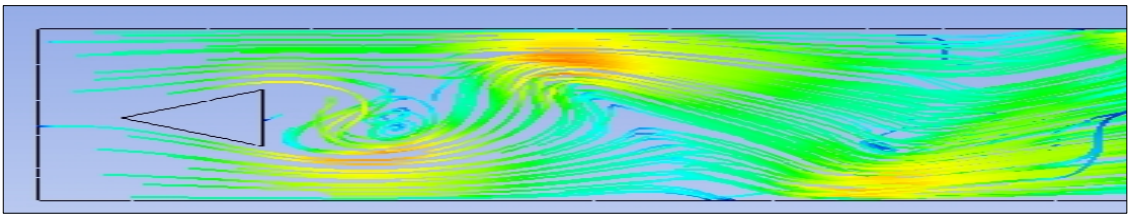


Fig. 3 Instantaneous spanwise Velocity field(Streamline)

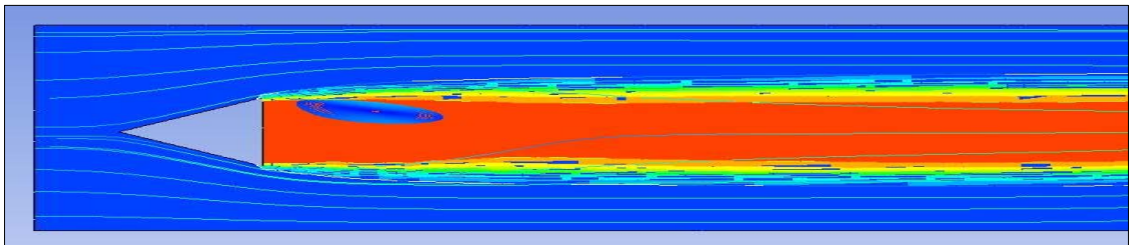


Fig. 4 Contour plot of instantaneous temperature field and streamlines

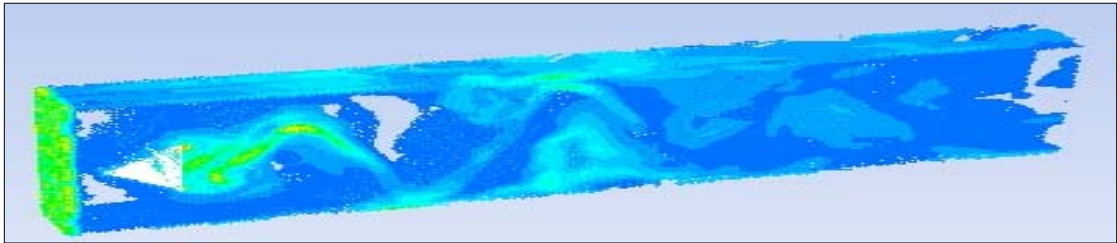


Fig. 5 Subgrid Turbulent Viscosity

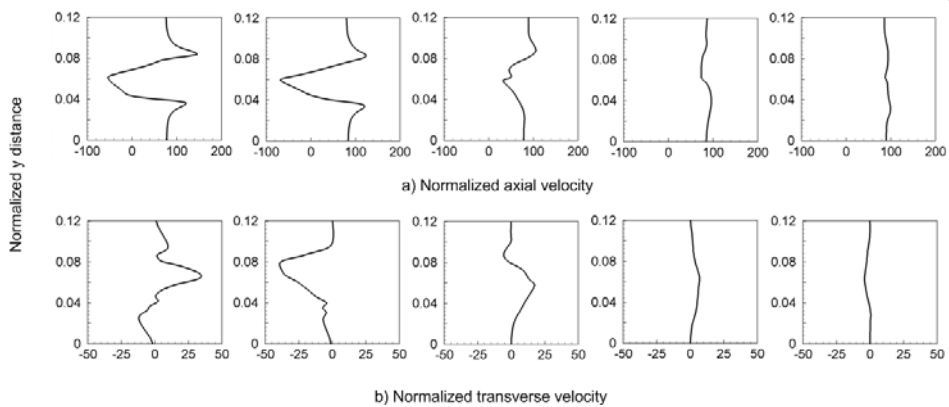


Fig. 6 각 Bluff Body 후방 x=15, 30, 150, 350, 500mm 위치에 따른 축방향의 속도와 수직 방향의 속도 변화 그래프 (Y방향의 단위는 m, X방향의 단위는 m/s)

특히 Bluff Body 후방 부분에서 온도가 매우 크게 나타나 있는데 이것은 재순환 영역의 발생으로 인한 화염이 안정화되었기 때문이다. 또 재순환 영역 이외에서는 화염이 발생하지 않았음을 보여주고 있다. 이러한 이유는 재순환 영역 이외의 빠른 속도로 인해 화염이 안정화되지 못하고 Blow out 되었기 때문이다. 이러한 점으로 보아 Bluff Body로 인한 재순환 영역 생성은 연소실의 연소를 돕는데 얼마나 중요한 영향을 미치는지 알 수 있다.

Fig. 5는 Subgrid Turbulent Viscosity를 보여주며 이와 관련하여 Fig. 8는 Bluff Body 후방에 나타나는 재순환 영역의 난류 강도에 대한 것을 나타낸 것이다. 난류 강도는 말그대로 난류의 강도를 나타내고 있는 것이다. 난류 강도를 보면 Bluff Body의 직 후방에서 난류 강도가

최대값을 가지는 것을 볼 수 있는데 이러한 점은 직 후방에서의 와류발생이 크게 일어난다는 점 때문이다.

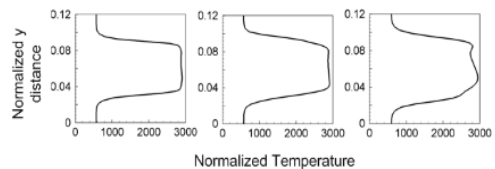


Fig. 7 x=15, 150, 500mm 에서의 온도분포

따라서 이러한 점은 Bluff Body 직후방에서 난류가 크게 생기고 떨어질수록 점점 난류의 크기가 작아진다는 것을 증명해주는 값이 된다. 최대값 이후에는 난류 강도의 값이 위의 레이놀

즈 응력 값과 같이 Bluff Body와 멀어질수록 즉 재순환 영역이 발생된 곳에서 멀어 질 수록 소멸되고 있는 것을 확인 할 수 있다. 난류 강도에 대한 것은 위에 식(12)로 나타낸 것과 같다. 위 그래프에서 x의 방향의 단위는 % 이고 y방향은 m 이다.

Fig. 9는 연소시 반응물과 생성물의 Mole Fraction 을 나타낸 것이다. 위 연소 반응모델에서 나타낸 화학 반응식을 수치해석 하여 그래프로 나타낸 것이다. 연소가 일어남으로서 프로판과 산소는 소멸되고 이산화탄소와 물이 생성되고 있는 것을 알 수 있다.

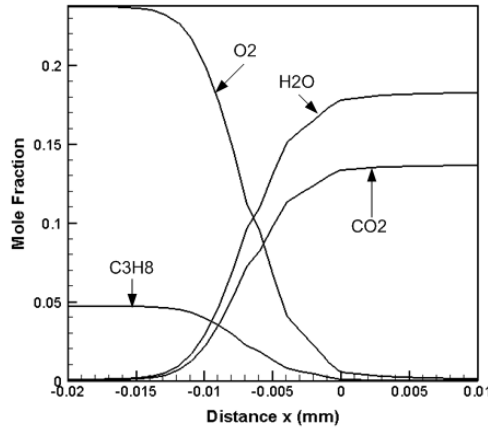


Fig. 9 반응물과 생성물의 Mole Fraction

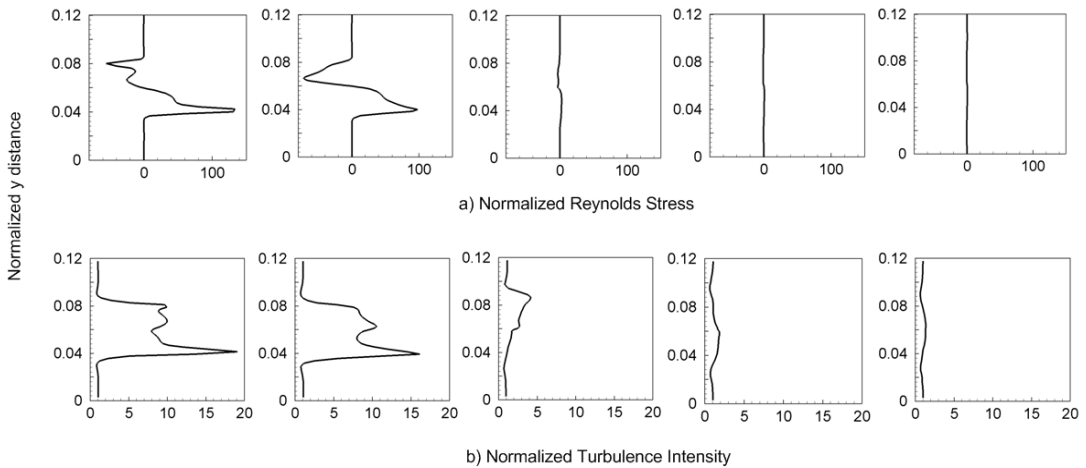


Fig. 8 각 Bluff Body 후방 x=15, 30, 150, 350, 500mm 위치에 따른 레이놀즈 응력 값과 난류 강도

5. 결 론

고속의 유동이 들어오는 연소실에서 Bluff Body는 유동에 재순환 영역을 발생시켜 난류를 만들고 유동을 체류시킴으로서 연소하고 화염을 고정시키는 것을 이 연구를 통해 확인할 수 있었다. 하지만 이 연구는 단지 수치적 해석만을 기초로 한 것이기 때문에 실제로 정확한 값을 내는 것은 아니다 단지 참고 자료로 삼을 수 있을 뿐이다. 이 해석에 대해 좀 더 신빙성을 갖기 위해서는 실험을 통하여 시뮬레이션한 결과

와 실험값을 비교하는 것이 가장 좋다. 또 단순한 비교에서 벗어나 당량비에 따른 연소의 변화를 해석하거나 고온의 연소 뒤에 발생하는 질소산화물에 대한 해석을 통해 친환경적인 연구도 필요할 것이다.

1. 재순환 영역이 발생한 곳에서 화염이 시작하여 화염의 길이가 후방으로 길어지는 것을 알 수 있고 화염의 분포가 Bluff Body 후방에 집중되어 있음을 알 수 있다.
2. 축방향의 속도와 수직방향의 속도분포를 해

석해 보면 재순환 영역이 Bluff Body 직후방에서 크게 나타남을 알 수 있다.

3. 재순환 영역으로 인해 화염 고속으로 들어오는 유동에 대한 체류 시간을 증가시켜 화염 Blow out 되지 않고 안정화 되었다.
4. 재순환 영역에서의 난류강도와 레이놀즈 응력의 값이 크게 나타났고 재순환 영역에서 멀어질수록 그 값이 소멸되었다.
5. 본문에서 해석하는 않았지만 예혼합 화염의 고온에서의 연소로 인한 질소산화물의 발생 양에 관한 환경 친화적 연구가 필요하고 고온에서 견딜 수 있는 재료로 연소실을 설계해야 한다.

참 고 문 헌

- [1] Shin-ichi INAGE, Perez VINCENT and Nariyoshi KOBAYASHI, 1997, "A Evaluation of Premixed Combustion around A Bluff Body using A New Combustion Model."
- [2] Stephen R. Turns, Jan 1999, "An Introduction to Combustion."
- [3] Eugenio Giacomazzia*, Valerio Battagliab, Claudio Brunoc, 23 July 2004, "The coupling of turbulence and chemistry in a premixed Bluff Body flame as studied by LES"
- [4] Shin-ichi INAGE and Nariyoshi KOBAYASHI, 1997, "A Numerical Simulation of Turbulent Premixed Flame Stabilized by a Pilot Flame and Bluff Body"
- [5] A.Kempf, R.P.Lindstedt, J. Janicka, september 2005, "Large-eddy simulation of a bluff-body stabilized nonpremixed flame"
- [6] Eduardo Fernandez-Tarrazo, Marcos Vera, Amable Linan, September 2005, "Liftoff and Blowoff of a diffusion flame between parallel streams of fuel and air."
- [7] Adres A. Chaparro, Baki M. Cetegen, October 2005, "Blowoff characteristics of Bluff-body stabilized conical premixed flames under upstream velocity modulation."
- [8] 공민석, 황철홍, 이창언, 김세원, September 2006, "Bluff-body 후방의 난류유동에 대한 대 와동모사(LES)의 성능검토"
- [9] 장동식, 이연원, 도덕희, 배대석, 김남식, August 2000, "LES에 의한 사각형 Bluff body 주위 유동장 수치해석"