

사각 둔각물체 주위의 반응유동장에 대한 수치적 연구

이정란 · 이의주[†]

부경대학교 안전공학과

Numerical Study on the Reacting Flow Field around Rectangular Cross Section Bluff Body

Jung-Ran Lee · Eui-Ju Lee[†]

Department of Safety Engineering, Pukyong National University

(Received November 11, 2013; Revised December 6, 2013; Accepted December 6, 2013)

요 약

본 연구에서는 엔진 나셀 화재를 모사하고 이전의 실험결과를 보충하기위해 이차원 둔각물체 주위의 반응유동장에 대하여 수치해석을 수행하였다. Direct numerical simulation (DNS) 기반의 fire dynamic simulator (FDS)를 이용하여 반응유동장의 특성을 조사하였고, 실험결과와의 비교를 통해 화학반응식을 결정하였다. 산화제는 공기를 사용하였고, 연료는 메탄을 사용하였다. 동축류와 대향류 분사 모두의 경우에 화염의 안정성이나 모양은 둔각물체 주위의 와 강도와 크기에 크게 영향을 받았다. 동축류 분사의 경우 계산에 통한 화염소화한계를 결정하였는데 연료유속이 커질수록 공기의 유속 또한 커지는 경향이 있었고, 그 속도들 또한 기존의 실험결과와 잘 일치함을 볼 수 있었다. 유동장 특성에 대한 화학반응의 효과를 고찰하기 위해 반응이 없는 경우를 계산하여 비교하였다. 모든 경우에 비반응 유동장에 비해 반응 유동장의 후류와는 크기도 감소하고 세기도 감소함을 볼 수 있었는데 이는 반응에 의한 후류의 온도증가가 유체의 밀도 및 모멘텀을 감소시켰기 때문으로 판단된다.

ABSTRACT

The Numerical simulation was performed on the flow field around the two-dimensional rectangular bluff body in order to simulate an engine nacelle fire and to complement the previous experimental results of the bluff body stabilized flames. Fire Dynamic Simulator (FDS) based on the Direct Numerical Simulation (DNS) was employed to clarify the characteristics of reacting flow around bluff body. The overall reaction was considered and the constant for reaction was determined from flame extinction limits of experimental results. The air used atmosphere and the fuel used methane. For both fuel ejection configurations against an oxidizer stream, the flame stability and flame mode were affected mainly by vortex structure near bluff body. In the coflow configuration, air velocity at the flame extinction limit are increased with fuel velocity, which is comparable to the experiment results. Comparing with the isothermal flow field, the reacting flow produces a weak and small recirculation zone, which is result in the reductions of density and momentum due to temperature increase by reaction in the wake zone.

Keywords : Bluff body, Flame stability, Wake, DNS, FDS

1. 서 론

둔각물체 주위의 유동장 특성은 다단연소나 화염안정화 기구로서 많이 사용되고 있다. 또한, 항공기 내 화재에 대해서도 중요한 기초연구로서 사용될 수 있다. 항공기 엔진 나셀의 여러 복잡한 구조 중 연료 파이프라인을 둔각물체로 형상화 하면, 연료 파이프라인에서 연료가 누출되었을 경우 점화되어 생성되는 화염을 모사할 수 있다. 일반적으로 둔각물체가 유체의 유동장에 존재하게 되면 둔각물체

의 전면부에 정체점이 생기고 유동의 속도가 매우 느려지며 후류에 재순환 영역이 형성되는데 이로 인해 난류가 발생하고 유동을 체류시킴으로써 화염을 고정시키는 화염안정화 역할을 하게 된다.

둔각물체에 의한 후류지역과 혼합, 그리고 안정성에 대해서는 예혼합화염과 관련된 많은 연구들이 수행되었지만 확산화염에 대해서는 연료희박 연소시 버너에서 생성되는 화염의 안정성을 향상시키기 위한 방법으로써 재순환 영역을 형성시키는 목적으로 주로 연구되어져 왔다⁽¹⁻⁸⁾. 이를

[†]Corresponding Author, E-Mail: ejlee@pknu.ac.kr
TEL: +82-51-629-6471, FAX: +82-51-629-6463

위해서는 일반적인 확산화염의 경우 동축류를 사용하게 되는데 연료와 산화제의 노즐 사이에 둔각물체를 두어 상류에 재순환 영역을 형성시키고 이에 관한 화염 안정성을 조사하였다. 하지만 이와 같은 축대칭 구조의 화염의 해석은 매우 어렵기 때문에 2차원의 실린더형태에서 연구를 수행하였는데 연료의 분사방향과 유동의 방향이 서로 반대인 대향류의 경우에 최근 실험과 수치적으로 연구를 수행하였다^(1,2). 실험적으로는 대향류와 동축류 등 두 가지 분사방향에 대해 화염 안정화 및 불활성 기체를 이용한 소화농도를 규명하였다. 또한 수치해석을 이용하여 비반응 유동장의 연료 및 산화제의 농도를 통해 실험결과를 예측하였고, 후류의 와동 패턴을 고찰하였다. 또한 동축류의 경우 2차원의 실린더형태에서 기본적인 유동장 정보 및 난류의 강도 그리고 화염 안정화에 대한 소수의 실험적, 수치적 연구가 진행되었다⁽⁹⁻¹¹⁾. 둔각물체 후류의 유동장에 대해서는 실린더를 이용한 연구가 많이 진행되어져 있으며 둔각물체 후류의 와 강도는 실린더의 모양, 길이에 영향을 받는다는 결과를 얻었다⁽¹⁴⁾. 또한 많은 경우에 연료와 공기유동의 방향은 모두 같은 방향의 분사로만 사용하였으며 화염 소화는 연료/산화제의 유속비 및 유속범위, 연료의 종류, 희석조건, 면적차폐율(blockage ratio), 그리고 둔각물체의 형상에 크게 의존하였다. 전반적인 변수들은 연료와 공기의 속도비인 FAVR(fuel to air velocity ratio) 로써 평가되어졌으며 그 결과는 수치해석에 의해 보완되어졌다.

엔진나셀을 형상화한 사각형 둔각물체 주위의 화염에 대해서 살펴본 이전 연구⁽¹⁾에서 화염형태와 소화특성 등을 조사하였지만, 유동장 내부의 정확한 정보를 측정하기 힘들어 보다 상세한 결과해석의 검증이 불가능하였다. 또한, 실험장치를 같은 형태의 형상에서 비반응 유동장의 특성을 수치적으로 조사하였지만⁽²⁾, 반응을 고려하지 않아 비반응 속도장과 농도장에 국한되었었고 실제 실험결과와의 비교가 어려웠다. 따라서 본 연구에서는 DNS과 화학반응을 고려하여 반응장의 수치해석을 통해 기존의 실험결과⁽¹⁾를 검증하고, 반응유동장 내의 특성 및 화염의 안정성을 연구하였다.

2. 수치해석방법

수치해석을 위한 프로그램은 NIST에서 개발한 FDS를 이용하였는데, 유동모델로서 DNS를 사용하였다. FDS는 유동모델로서 Large Eddy Simulation (LES)와 DNS를 제공하지만, LES인 경우에는 화학반응식의 고려 또는 수정이 불가능하다. 따라서 본 연구에서는 반응 유동장에서의 연소반응을 더 명확하게 추적하기 위해 유한율 연소개념을 사용하기 위해 DNS를 선택하여 계산을 수행하였다.

반응의 용이성을 위하여 계산은 2차원으로 진행하였으며 분사방향은 실험에서 설정된 형상과 같이 대향류와 동

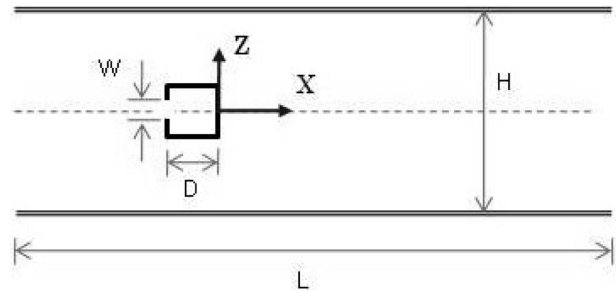


Figure 1. Schematics of simulated configuration with axes.

축류 등 두 가지로 동일하게 설정하였다. 연료는 메탄을 사용하였고 산화제로는 공기를 사용하여 2차원 채널의 입구에서 유입되도록 하였다. 연료와 산화제의 경계조건으로는 유속이 일정한 균일유동(uniform flow)을 가정하였고, 각 물질의 초기 물성치는 STP조건으로서 298 K과 1 atm에서의 값으로 설정하였다. 연료 계산이 수행되어진 형상 및 좌표를 Figure 1에 도시하였다. 전체 계산영역은 12 cm (H) × 120 cm (L)로 택하였고, 둔각물체의 크기는 실험에서와 같이 3 cm (D) × 3 cm (D)로 두었다. 이 둔각물체의 연료분사노즐인 홀의 크기는 2 mm (W)로 설정하였다. 또한 하류방향의 좌표(x)는 둔각물체의 하류 끝지점을 원점으로 표시하였다.

본 연구에서는 메탄의 산화반응식을 식(1)과 같이 완전 화학반응식(overall one reaction)으로 가정하여 설정하였고 반응율(reaction rate)은 식(2)와 같이 Arrhenius 형태로 가정하였다. 이때 계산의 편의성을 위하여 온도의 지수를 무시하였고(n=0) 온도의 효과는 exponential 항에 포함하였다.



$$k_{ov} = AT^n \exp(-E_a/RT) [\text{Fuel}]^a [\text{Oxidizer}]^b \quad (2)$$

반응율의 나머지 상수들의 설정은 수치해석에 있어 매우 중요하지만 대상의 기하학적 형태나 유동모델이 바뀌었을때 일반적으로 최적의 상수조합 또한 변화하므로 이러한 상수들의 조합을 찾는 것은 중요하면서도 어려운 일이다. 본 연구에서는 메탄 산화반응에 대하여 여러 사전 연구들⁽²⁰⁾을 참고하여 검토하였고 검토에 사용된 상수조합은 Table 1에 나타내었다.

기존 반응식 검토연구⁽²⁰⁾에서 위의 반응율 상수들의 연소속도(burning velocity)를 넓은 당량비에 대해 상세반응

Table 1. Constant Sets for Reaction Rate

	A	E _a	a	b
Set 1	1.3×10 ⁸	48.8	-0.3	1.3
Set 2	6.7×10 ¹²	48.8	0.2	1.3
Set 3	1.0×10 ¹³	48.8	0.7	0.8
Set 4	1.3×10 ⁸	48.8	1.0	1.0

기구(detailed reaction mechanism)와 비교, 검토한 결과를 보면 Table 1의 set 1과 set 2는 0.5~1.5 범위의 당량비에서 상세반응기구와 잘 일치했으나 set 3과 4는 당량비 1 근처에서만 일치하였다. 또한 본 연구를 위한 최적의 반응율 상수 결정을 위해 위의 예비 반응상수의 세트를 본 연구의 계산에 적용하였고, 비교를 위해 동축류 실험의 가연한계를 참조값(reference value)으로 가정하였다. 수치해석 결과 넓은 당량비에서 유효하였던 set 2가 실험결과와 가장 잘 일치하였으며, 이를 본 연구를 위한 메탄의 최종 산화 반응 상수로서 아래와 같이 채택하였다.

$$\begin{aligned} A &= 6.7 \times 10^{12} \text{ KJ/mol/s} \\ E_a &= 48.4 \text{ Kcal/mol} \\ a &= 0.2, b = 1.3 \end{aligned} \quad (3)$$

이러한 결과는 본 연구의 전체적인 당량비 조건이 연료 희박 상태이지만 확산화염의 특성상 국부적으로 연료과잉의 조건이 포함되어있기 때문에 넓은 당량비 조건에서 가장 잘 일치하는 반응율 상수가 선정되는 것이 타당하다고 판단된다.

결정된 반응율 식으로부터 둔각물체 주위의 반응유동장을 해석하기 위해 가장 적합한 격자를 설정하여야 한다. 격자의 형상은 정사각형 모양의 2차원격자를 생성하였고, 격자크기 의존성을 0.8 mm부터 0.1 mm 단위로 줄여가며 계산을 수행하였는데, 결과가 크게 달라지지 않는 가장 큰 격자크기인 0.6 mm를 최종 격자 크기로 사용하였다. 또한, 수치해석에 있어 초기 점화방법에 따라 시간이 많이 흐른 후 결과가 일부 상이함을 발견하였다. 본 연구에서는 일반적인 방법인 초기조건으로 일정 시간동안 높은 온도를 부과하는 방법대신에 전체유동장의 초기온도를 점화온도 이상으로 놓고, 경계에서 유입되는 공기의 온도를 상온으로 설정하였다. 계산영역을 경계에서 유입공기가 모두 지나가게 된 후 시간적분 값이 변화가 없을 때의 데이터를 얻어 해석하였다.

3. 결과 및 토의

반응 유동장에서의 계산을 통해 연료와 공기의 유속에 따른 화염안정성을 조사하였다. 또한, 공기유속에 따라 반응유동장의 온도 및 연료의 물분율을 조사하여 속도장이 둔각물체에 안정화된 화염에 미치는 영향을 정성적으로 고찰하였다. 마지막으로는 반응을 무시한 DNS 유동해석을 통하여 화학반응의 영향을 살펴보았다.

Fig. 2에 동축류 둔각물체 주위 화염안정화 선도를 도시하였다. 보다 직접적인 비교를 위해 이전의 실험적 연구결과⁽¹⁾에 계산을 통해 얻어진 가연한계 지점을 함께 표시하였다. 그림에서 보듯이 동축류인 경우는 실험에서 얻어진 가연한계와 유사한 결과를 얻을 수 있었다. 특히 저속의 공기유속에서는 그 결과가 실험값과 매우 일치하는데

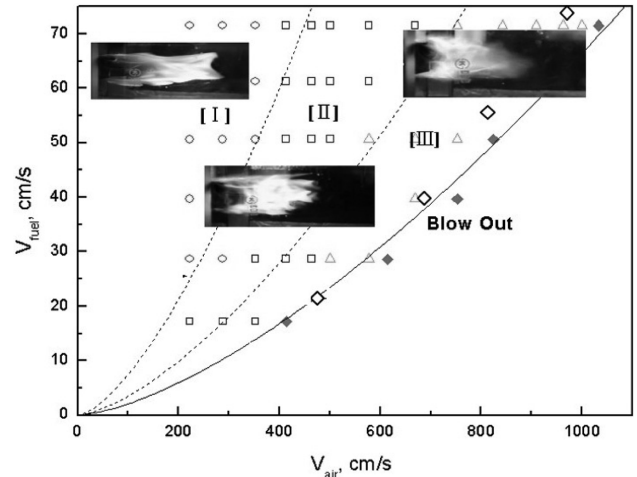


Figure 2. Flammable limits in the experimental flame stability map for co-flow configuration. Solid diamond symbol (◆) indicates the experimental values and hollow symbol (◇) does numerical ones.

이는 난류의 강도가 작기 때문으로 판단된다. 본 연구에서는 난류의 강도를 모사하기 어려우므로 초기 난류강도를 크게 줄 수 없었다. 하지만 실험결과는 블로워(blower)로 공기를 공급하였고 중간에 정류격자를 위치시켰기 때문에 속도가 큰 경우에는 초기의 난류강도가 화염소화에 중요한 인자로서 생각된다. 또한, 이러한 가연한계 데이터는 실험결과와의 비교를 통해 수치해석 결과의 타당성을 검증하였다고 할 수 있다.

반응 유동장에서의 온도분포와 연료로 사용한 메탄의 질량분율을 조사하였다. 대향류인 경우에 연료의 유속은 60 cm/s로 동일하게 두었고 공기의 유속을 저속과 고속의 두 가지 조건으로 변화시켜 그 결과를 Figure 3과 Figure 4에 각각 도시하였다. 공기의 유속이 저속인 300 cm/s인 경우는 실험에서 안정한 화염이 나타났던 조건이고 공기 유속 500 cm/s인 경우는 청염이 나타났던 실험조건이다. Figure 3의 온도분포를 보면 공기유속이 300 cm/s인 경우

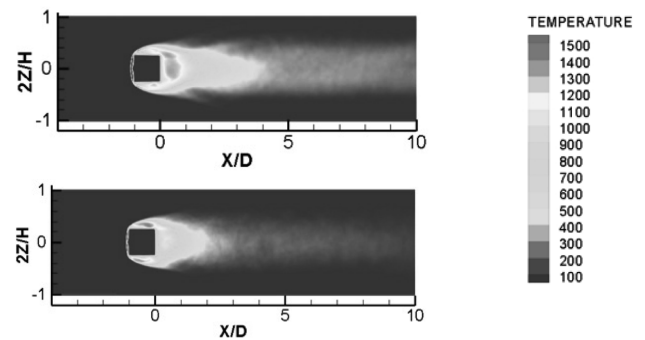


Figure 3. Temperature field for two different air velocities in the counterflow configuration. Fuel velocity was fixed at 60 cm/s and air velocities were 300 cm/s (up) and 500 cm/s (down), respectively.

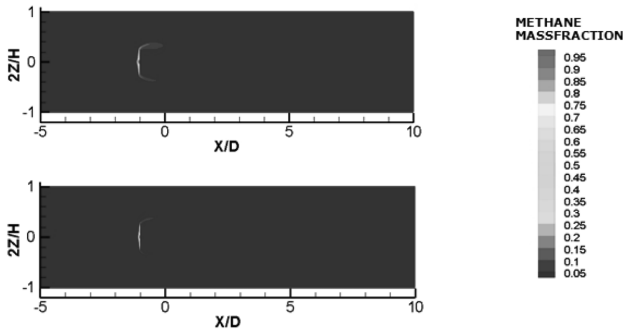


Figure 4. Methane mole fractions for two different air velocities in the counterflow configuration. Fuel velocity was fixed at 60 cm/s and air velocities were 300 cm/s (up) and 500 cm/s (down), respectively.

는 공기유속이 비교적 작은 유속에서 나타나는 화염의 형태로서 화염의 길이가 상대적으로 길게 나타난다. 따라서 온도분포 또한 하류로 비교적 길게 고온영역이 형성된다. 공기의 유속이 비교적 큰 경우, 즉 500 cm/s인 경우는 화염이 짧게 형성되어 온도분포가 공기유속이 작은 경우보다 짧게 나타난다. 또한 공기 유속이 낮을 때 보다 높을 때 둔각물체 상·하 부분의 재순환 영역의 강도가 강해지기 때문에 온도가 높은 부분의 분포가 후류가 아닌 상·하로 이동하였음을 확인할 수 있다. Fig. 4의 질량분율 분포는 공기유속이 작은 경우 더 높은 연료 질량 분율을 갖는 것을 확인할 수 있었는데 이는 비반응 유동장에서의 결과에서 확인한 바와 같이 저속의 공기유동에서는 초기혼합이 저하되고, 따라서 확산화염의 특성을 보다 강하게 가지고 있기 때문이다.

동축류인 경우 반응 유동장에서의 온도분포는 대향류인 경우와 마찬가지로 연료의 유속은 60 cm/s로 동일하게 두고 공기의 유속만을 변화시켜 수치해석을 진행하였으며 온도와 연료의 질량분율 분포를 Figure 5와 Figure 6에 나타내었다. Figure 1의 화염안정화선도에서 보듯이 공기의

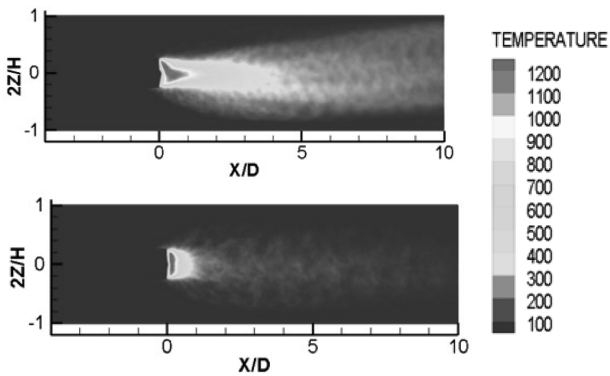


Figure 5. Temperature field for two different air velocities in the coflow configuration. Fuel velocity was fixed at 60 cm/s and air velocities were 300 cm/s (up) and 600 cm/s (down), respectively.

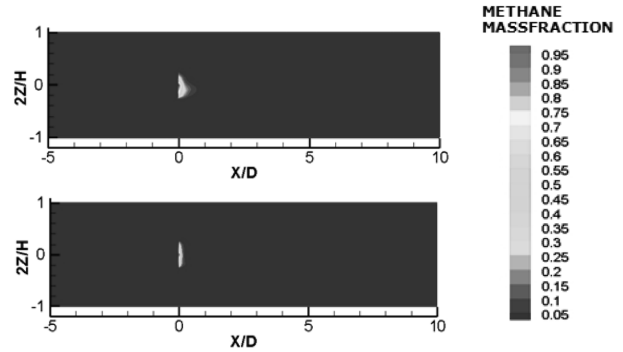


Figure 6. Methane mole fractions for two different air velocities in the coflow configuration. Fuel velocity was fixed at 60 cm/s and air velocities were 300 cm/s (up) and 600 cm/s (down), respectively.

유속이 300 cm/s인 경우는 실험결과에서 안정한 회염이 나타났던 조건이었으며 공기유속 600 cm/s인 경우는 불안정한 화염이 나타났던 실험조건이다. 동축류에서와 마찬가지로 온도분포는 화염의 형상과 유사하게 나타나는데 공기유속이 비교적 작은 유속에서는 화염의 길이가 후류로 매우 길게 나타나고 공기유속이 큰 경우는 화염의 길이가 공기유속이 작을 때에 비해 짧게 형성되기 때문에 화염의 온도분포역시 유사한 형상을 띄게 된다. 또한 공기의 유속이 커지는 경우 둔각물체 하류에서의 재순환 영역의 강도가 강해지므로 온도와 질량분율의 분포가 둔각물체 쪽으로 더 이동하게 된다. 따라서 동축류의 경우에는 공기유속에 다른 재순환영역의 강도가 전체 연소장을 지배한다고 볼 수 있다.

반응의 효과를 고찰하기 위해 같은 유속조건에서 반응 유동장과 비반응 유동장에서의 시간평균된 유동의 유선(streamline)을 비교하였다. Figure 7에 도시된 대향류인 경우 유동장 분포는 비반응 유동장인 경우 반응 유동장에서 보다 재순환영역이 조금 큰 것을 확인할 수 있었는데 이는

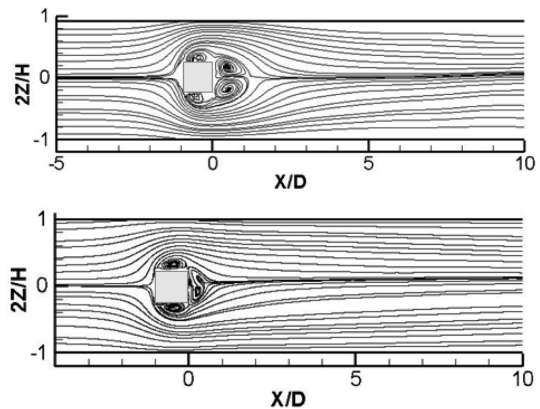


Figure 7. Time-averaged streamlines of isothermal (up) and reacting (down) flows in the counterflow configuration. Fuel velocity was fixed at 60 cm/s and air velocity was 300 cm/s.

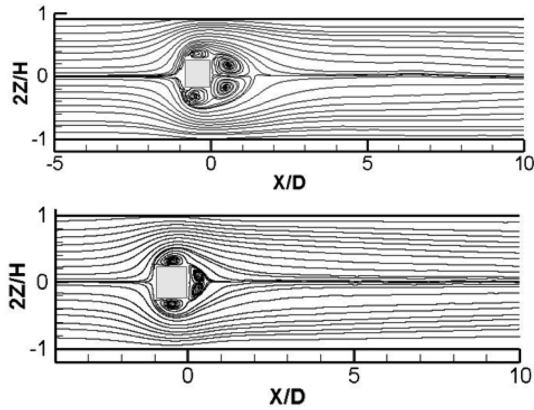


Figure 8. Time-averaged streamlines of isothermal (up) and reacting (down) flows in the coflow configuration. Fuel velocity was fixed at 60 cm/s and air velocity was 600 cm/s.

반응 유동장은 연소가 일어나고 있기 때문에 후류의 공기 밀도가 낮아져 모멘텀의 감소로 와의 강도가 작아져 나타나는 현상으로 판단된다. 그 외 비반응 유동장과 반응 유동장에서 모두 공기 유속에 따른 차이는 크게 발견할 수 없었다. 이는 공기의 유속이 연료의 유속에 비해 매우 크고 또한 연료의 분사 방향 또한 후류의 재순환 영역에 영향을 끼치지 않기 때문에 전반적인 유동장 분포는 둔각물체로 불어오는 공기의 유동에 전적으로 지배되기 때문이다.

Figure 8에 나타낸 동축류인 경우 대향류와 마찬가지로 공기의 유속이 커질수록 상·하 부분의 재순환 영역이 커지는 것을 확인 할 수 있으며 따라서 후류의 재순환 영역이 둔각물체 쪽으로 당겨져 형성되는 것을 알 수 있다. 또한 반응 유동장과 비반응 유동장을 비교해보면 비반응 유동장에서는 완전한 한 쌍의 재순환 영역이 발생하는데 비해 반응 유동장에서는 매우 약한 재순환 영역이 발생하는 것을 볼 수 있다. 이는 마찬가지로 연소에 의한 영향이며 대향류인 경우 연료가 둔각물체 후류에서 분사되기 때문에 후류에 화염이 형성되며 따라서 화염의 영향을 더 크게 받기 때문에 대향류와 비교했을 때 더 약해진 재순환 영역을 형성하는 것이라 판단된다. 공기 유속에 대한 차이는 비반응 유동장에서는 역시 연료의 유속이 동일하기 때문에 연료의 영향이 예상되어지는 대향류에서도 공기의 유속에 따라 유동장 형태가 결정된다고 할 수 있다. 반응 유동장인 경우는 공기의 유속이 작은 경우, 큰 경우에 비해 재순환 영역이 거의 발생하지 않는 것을 볼 수 있는데 이는 연료의 유속은 같기 때문에 그에 대한 영향은 같으나 주위의 공기 유속 차이 때문에 공기의 유속이 더 큰 경우 비교적 안정화된 재순환 영역을 형성시키는 것으로 판단된다.

4. 결 론

엔진나셀 화재를 모사한 사각형 둔각물체 주위의 화염

에 대해서 살펴본 이전의 실험적 연구를 보완하고 보다 자세한 유동장 정보를 얻기 위하여 DNS 해석을 통하여 연구를 수행하였고 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 완전화학반응을 고려하기 위해 반응율의 상수를 본 연구 유동장에 검증하여 결정하였다. 결정된 상수조합은 넓은 당량비 조건에서 가장 잘 일치하는 상수들이었으며, 본 연구의 반응이 국부적으로는 큰 당량비의 변화가 존재하므로 타당하다고 판단된다.

2) 동축류의 경우 가연한계를 수치적으로 조사하였다. 가연한계는 낮은 공기유속에서 보다 잘 일치하고, 난류강도가 커지는 큰 유속에서는 오차가 커진다. 또한, 가연한계 결과는 실험결과와의 비교를 통해 수치해석 결과의 타당성을 검증하였다고 할 수 있다.

3) 공기의 유속이 커지면 둔각물체 후류에 강한 와류가 생성되어 반응지역이 둔각물체 근처로 이동하게 된다. 따라서 화염의 길이는 짧아지고 반응최고온도는 높아지는 효과를 얻을 수 있었다.

4) 비반응 유동장인 경우 반응 유동장에서보다 재순환영역이 조금 큰 것을 확인 할 수 있었는데 이는 반응 유동장은 연소가 일어나고 있기 때문에 후류의 공기밀도가 낮아져 모멘텀의 감소로 와의 강도가 작아져 나타나는 현상으로 판단된다.

후 기

이 논문은 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임 (2012R1A1A4A01014462).

References

1. J. R. Lee and E. J. Lee, "The Characteristic of Extinction of Engine Nacelle Fire using a Bluff Body", *Journal of the Korean Society of Safety*, Vol. 27, No. 1, pp. 21-25 (2012).
2. J. R. Lee and E. J. Lee, "Numerical Study on the Isothermal Flow Field around Rectangular Cross Section Bluff Body", *Journal of the Korean Society of Safety*, Vol. 27, No. 5, pp. 35-41 (2012).
3. F. Takahashi, W. J. Schmoll and V. M. Belovich, "Suppression of Bluff-Body Stabilized Diffusion Flames", *AIAA*, pp. 98-3529 (1998).
4. S. J. Shanbhogue, S. Husain and T. Lieuwen, "Lean Blowoff of Bluff Body Stabilized Flames: Scaling and Dynamics", *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol. 35, pp. 98-120 (2009).
5. I. Esquiva-Danoa, H. T. Nguyena and D. Escudiea, "Influence of a Bluff-Body's Shape on the Stabilization Regime of Non-Premixed Flames", *Combust and Flame*

- Vol. 127, pp. 2167-2180 (2001).
6. B. B. Dallya, A. R. Masria, R. S. Barlowb, G. J. Fiechtnerb and D. F. Fletcher, "Measurements of NO in Turbulent Non-Premixed Flames Stabilized on a Bluff Body", *Proc. Combust. Inst.*, Vol. 26, pp. 2191-2197 (1996).
 7. A. Kempfa, R. P. Lindstedta and J. Janickab, "Large-Eddy Simulation of a Bluff-Body Stabilized Nonpremixed Flame", *Combust and Flame*, Vol. 144, pp. 170-189 (2006).
 8. B. B. Dallya, D. F. Fletcherb and A. R. Masria, "Flow and Mixing Fields of Turbulent Bluff-Body Jets and Flames", *Combustion Theory and Modelling*, Vol. 2, Issue 2, pp. 193-219 (1998).
 9. Y. Chen, C. Chang, K. Pan and J. Yang, "Flame Lift-off and Stabilization Mechanisms of Nonpremixed Jet Flames on a Bluff-body Burner", *Combustion and Flame*, Vol. 115, pp. 51-65 (1998).
 10. P. Koutmos, C. Mavridis and D. Papailiou, "A Study of Turbulent Diffusion Flames Formed by Planar Fuel Injection into the Wake Formation Region of a Slender Square Cylinder", *Proc. Combust. Inst.*, Vol. 26, pp. 161-168 (1996).
 11. A. G. Bakroziis, D. Papailiou and P. Koutmos, "A Study of the Turbulent Structure of a Two-Dimensional Diffusion Flame Formed Behind a Slender Bluff-Body", *Combust and Flame*, Vol. 119, pp. 291-306 (1999).
 12. D. Papailiou, P. Koutmos and A. G. Bakroziis, "Simulations of Fuel Injection and Flame Stabilization in the Wake Formation Region of a Slender Cylinder", *Proc. Combust. Inst.*, Vol. 28, pp. 91-99 (2000).
 13. P. Koutmos, D. Papailiou and A. Bakroziis, "Experimental and Computational Study of Square Cylinder Wakes with Two-Dimensional Injection into the Base Flow Region", *European J. Mech. B/Fluids*, Vol. 23, Issue 2, pp. 353-365 (2004).
 14. B. J. Armstrong and F. H. Barnes, "A Comparison of the Structure of the Wake behind a Circular Cylinder in a Steady Flow with That in a Perturbed Flow", *Physics of Fluid*, Vol. 30, Issue 1, pp. 19-26 (1987).
 15. I. Esquivia-Dano, H. T. Hguyen and D. Escudie, "Influence of a Bluff-Body's Shape on the Stabilization regime of Non-premixed Flames", *Combustion and Flame*, Vol. 127, pp. 2167-2180 (2001).
 16. K. McGrattan, B. Kelin, S. Hostikka and J. Floyd, "Fire Dynamics Simulator User's Guide", NIST special publication 1019-5 (2005).
 17. I. Glassman and R. A. Tetter, "Combustion", Elsevier, San Diago (2008).
 18. D. H. Kim, K. S. Yang and M. Senda, "Large Eddy Simulation of Turbulent Flow in Planar Combustor", *KSME*, Vol. 24, No. 10, pp. 1409-1416 (2000).
 19. R. H. Chen, J. F. Driscoll, J. Kelly, M. Namaziam and R. W. Schefer, "A Comparison of Bluff-Body and Swirl-Stabilized Flames", *Combust. Sci. Technol.*, Vol. 71, pp. 197-217 (1990).
 20. C. K. Westbrook and F. L. Dryer, "Simplified Reaction Mechanisms for the Oxidation of Hydrocarbon Fuels in Flames", *Combustion Science and Technology*, Vol. 71, pp. 31-43 (1981).