

난류 고리가 장착된 가스발생기의 혼합 증진에 관한 대 와동 모사

유정민* · 이창진**

LES analysis of mixing enhancement in Gas Generator with Turbulence Ring

Jungmin Yu* · Changjin Lee**

ABSTRACT

LES code was developed and verified to investigate the turbulence evolution in the gas generator equipped with turbulence ring. We compared mixing enhancement of various turbulence rings having different shape and size. To qualify the mixedness, we used two perturbation values of energy and enstrophy.

초 록

난류 고리가 장착된 가스발생기의 난류 생성을 연구하기 위하여 LES 코드가 개발되어 검증을 하였다. 난류 고리의 형상과 길이를 변경에 따른 난류 발생 정도를 비교하였으며, 혼합 정도를 비교하기 위하여 유동장의 변동 속도를 이용한 두 가지 변동량의 값을 구하였으며, 혼합 정도를 정량화 하였다.

Key Words: Gas Generator(가스발생기), Turbulence Ring(난류 고리), Mixing Enhancement(혼합 증대)

1. 서 론

가스발생기는 액체로켓 터보펌프 시스템의 터빈을 구동시키는 역할을 하는 장치이다. 터빈 블레이드의 열적 손상을 방지하기 위하여 가스발생기의 출구 온도에는 제한이 있으며 이를 위해 농후 또는 희박 연소를 하게 된다. 따라서 가스

발생기의 연소는 농후 연소의 경우 비평형 화학 반응이 주를 이루게 된다. 가스발생기의 연소 특징은 연소의 대부분이 인젝터 근방의 앞부분에서 발생하게 되며, 후반부로 가면서 혼합이 이루어지며 이에 따라 온도가 낮아지게 된다.

한편, 난류 고리는 연소기 내부의 연료와 산화제가 잘 혼합되도록 하는 장치이다. 혼합된 정도에 따라 가스발생기의 출구의 온도 분포를 균일하게 해주며, 출구 온도의 결정은 가스발생기 뿐만 아니라 전체 터보 펌프 시스템의 설계에 중요한 요소이다. 현재까지 난류 고리에 대한 연구

* 건국대학교 항공우주공학과

** 건국대학교 항공우주공학과

연락처, E-mail: cjlee@konkuk.ac.kr9

는 실험 및 수치적 연구가 많이 이루어졌다. Lawver, B., R.[1]은 농후 및 희박 연소에 대한 실험을 통해 난류 고리 사용 경우 온도 균일 효과를 보여주었으며, Kim, S.,[2]은 RANS 계산을 통해 난류 고리와 Splate plate의 위치와 크기를 변화시켜 가며 가스발생기 출구의 온도 분포를 계산하여 최적의 조합을 구하였다. 하지만 난류 고리를 통한 내부 유동장의 혼합 정도를 나타내기에는 평균 유동장의 정보만을 알 수 있는 RANS 계산으로는 정확한 설명이 부족하다. Fureby, C.[3]는 afterburner에 대한 LES 계산을 수행하여 유동장이 갖는 특성에 대한 규명을 하였으며, LES 모델의 성능을 검증하였다.

본 연구에서는 가스발생기의 난류 고리를 통한 난류의 발생과 유동장의 특징을 이해하기 위하여 LES 코드를 개발하였으며 검증하였다. 또한 혼합 정도를 정량적으로 구체화하기 위하여 변동 속도를 이용한 식을 통해 계산하였으며, 난류 고리의 길이 및 형상 변화에 따라 비교하였다.

2. LES 수치 기법

LES는 유동장의 큰 스케일에 대해서는 직접 해석하고, 작은 스케일에 대해서는 모델링을 하는 방법이다. 난류 고리를 통한 난류 발생 정도와 유동장의 박리 및 재부착을 통한 혼합 증진 정도를 살펴보기 위해서는 LES 해석이 적절한 것으로 판단되며 코드 개발을 하여 검증 및 본 연구를 진행하였다.

2.1 지배방정식

일반적인 연소의 문제는 저 마하수에서 주로 발생하므로 예조건화 기법을 통한 코드가 개발되었다. 필터링이 수행된 Navier-Stokes 방정식은 다음과 같다.[4,5]

$$\Gamma \frac{\partial q}{\partial t} + \frac{\partial(f_j - f_{v_j})}{\partial x_j} = 0 \quad (1)$$

여기서, q 는 유동 변수이며 f_j 와 f_{v_j} 는 각각의 방향

에 대한 비점성 및 점성항을 나타낸다.

$$q = \begin{bmatrix} \bar{p} \\ \bar{u}_i \\ \bar{T} \end{bmatrix}, \quad f_j = \begin{bmatrix} \bar{\rho} \bar{u}_i \\ \bar{\rho} \bar{u}_i \bar{u}_j + \bar{p} \delta_{ij} \\ \bar{\rho} \bar{u}_j H \end{bmatrix}, \quad f_{v_j} = \begin{bmatrix} 0 \\ \bar{\sigma}_{ij} - \tau_{ij} \\ \bar{u}_i \bar{\sigma}_{ij} - \bar{q}_j \end{bmatrix} \quad (2)$$

위 식에서 $\bar{\rho}$ 와 \bar{p} 는 필터된 밀도와 압력이며, \bar{u}_j 는 직교좌표계의 속도 성분이다. 속도와 좌표계, 시간은 무차원화 하였으며, 2차 및 4차의 FV skew-symmetric 중심차분법이 사용되었다. 입구에서 완전 발달 속도를 만들어내기 위하여 주기(periodic) 조건을 사용하였으며 이는 본 연구인 난류 고리가 장착된 가스발생기의 입구 조건으로 사용되었다.

2.2 LES 코드 검증

코드의 검증을 위해서 실린더형 덕트에 대해서 계산을 수행하였다. 격자는 각 방향에 대하여 64, 96, 128개를 사용하였으며, 계산 결과는 난류가 충분히 발달하도록 무차원화 시간 90 후에 60을 평균하여 구하였다.

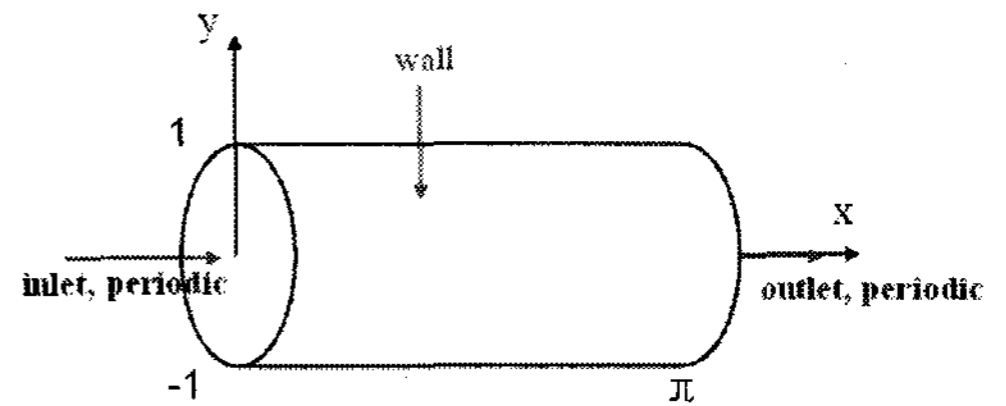


Fig. 1 Schematic of the computational domain for the verification of code

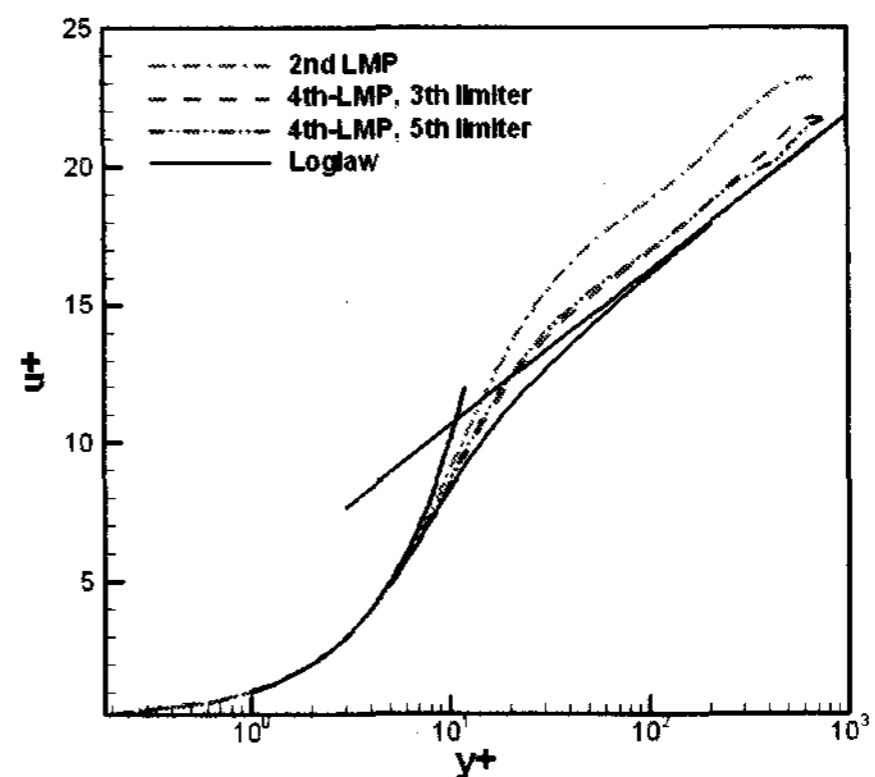


Fig. 2 Mean velocity distribution

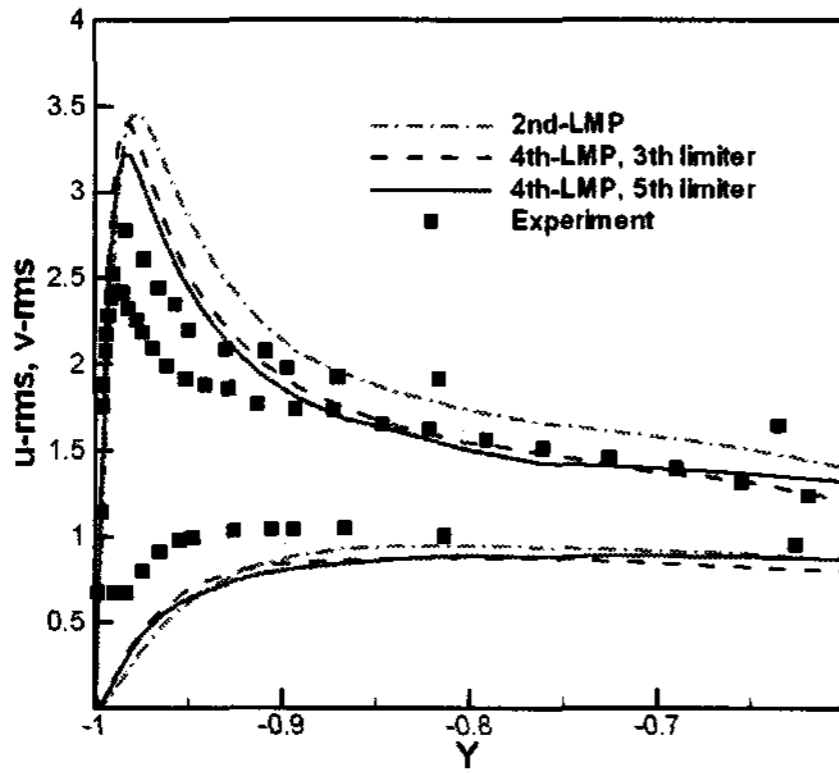


Fig. 3 Turbulent intensity

평균 속도 분포와 난류 강도의 결과는 위의 Fig. 2, 3과 같으며 고차의 해석 기법을 사용하였을 경우 정확도가 높아지는 것을 알 수 있다.

3. 수치 해석 방법

3.1 계산 형상

아래의 table 1은 계산에 사용된 난류 고리의 3가지 형상이다. 난류 고리의 길이는 case 1, 2 그리고 4의 경우 6.8 mm이며, case 3의 경우는 type 1과 같은 형상에서 길이를 8.6 mm로 늘린 것이다. 계산은 레이놀즈 수 23,000에서 수행되었으며 방대한 계산 양으로 인해 MPI 기법을 이용하여 55개의 CPU를 통해 계산하였으며, 총 격자 수는 대략 100만개 정도이다.

Table 1. Shapes of turbulence ring

type 1	type 2	type 3

Table 2. Description of 4 cases

case	size(mm)	shape
1	6.8	type 1
2	6.8	type 2
3	8.6	type 1
4	6.8	type 3

4. 혼합 정도의 계산

혼합 정도를 정량적으로 구하여 난류 고리의 형상 및 길이 변화에 따라 비교하기 위하여, perturbation energy와 perturbation enstrophy를 구하였으며 이 물리량들은 다음과 같이 정의된다.[6] Perturbation energy는 변동 속도의 운동 에너지의 공간 적분한 값이며, perturbation enstrophy는 vorticity의 변동량을 이용해 구해진다.

$$\text{Perturbation energy; } \frac{1}{2V} \int_{\Omega} |\underline{w}|^2 dV \quad (3)$$

$$\text{Perturbation enstrophy; } \frac{1}{2V} \int_{\Omega} |\nabla \times \underline{w}|^2 dV \quad (4)$$

위의 식에서 \underline{w} 는 속도의 변동량으로 다음과 같이 구해지며, V 는 공간 Ω 에 대한 volume을 나타낸다.

$$\underline{w} = \underline{W} - \bar{\underline{W}} \quad (5)$$

여기서, \underline{W} 는 순간 속도, $\bar{\underline{W}}$ 는 평균 속도 성분으로 다음과 같다.

$$\underline{W} = (u_x, u_y, u_z), \quad \bar{\underline{W}} = (\bar{u}_x, \bar{u}_y, \bar{u}_z) \quad (6)$$

5. 계산 결과

5.1 기본 형상 결과

Figure 4는 난류 고리가 없는 형상에 대한 순간 속도장의 결과이고, Fig. 5는 Vorticity의 분포이며 입구의 완전 발달 속도가 뒷부분으로 이동하면서 vorticity의 강도가 점차 감소한다.

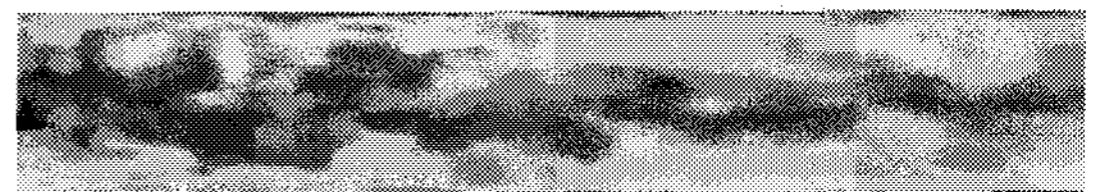


Fig. 4 Contour of U-velocity on the center section of x-y plane

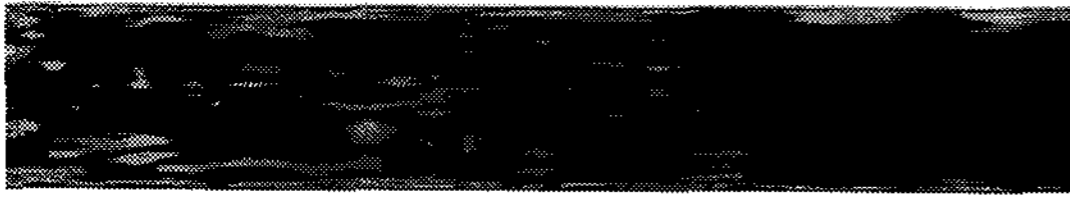


Fig. 5 Contour of vorticity on the center section of x-y plane

5.2 Case 1 결과

난류 고리가 장착되었을 경우 내부 유동장은 매우 복잡해지며, 아래의 Fig. 6, 7과 같이 난류 고리 근처에서 최대 속도를 갖으며 난류 고리를 지나면서 vorticity의 값이 매우 크게 나타난다.

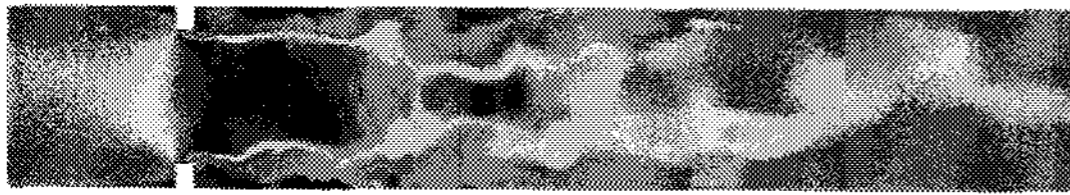


Fig. 6 Contour of U-velocity on the center section of x-y plane



Fig. 7 Contour of vorticity on the center section of x-y plane

5. 결론 및 향후 계획

본 연구에서는 난류 고리가 장착된 가스발생기 내부의 유동 해석을 위하여 LES 코드를 개발하였으며 검증하였다. 혼합 정도를 정량적으로 비교하기 위하여 변동 속도를 이용한 두 가지 값을 구하였다. 향후 난류 고리의 위치 및 최적화된 길이를 찾는 연구를 진행할 예정이며 연소 모사를 위한 G-방정식의 연구가 계획 중에 있다.

1. Lawver, B., R., "Testing of Fuel/Oxidizer-Rich, High-Pressure preburners." NASA CR-165609
2. Kim, S., "Design Study of an Advanced Gas Generator," 1993, AIAA 93-2158, 29th Joint Propulsion Conference and Exhibit
3. Fureby, C., "Large eddy simulation of combustion instabilities in a jet engine afterburner model," 2000, Vol. 161, pp. 213-243
4. Weiss, J. M., Maruszewski, J. P., and Smith, W. A., "Implicit Solution of Preconditioned Navier-Stokes Equations Using Algebraic Multigrid," AIAA Journal, Vol. 37, No. 1, 1999, pp. 29-36.
5. Park, S. H., Lee, J. E., and Kwon, J. H., "Preconditioned HLLE Method for Flows at All Mach Numbers," AIAA Journal, Vol. 44, No. 11, 2006, pp. 2645-2653.
6. Balogh, A., Aamo, O. M., "Optimal Mixing Enhancement in 3-D Pipe Flow," 2005, Vol. 13, No. 1, IEEE Transactions on Control Systems Technology
7. Yu, J., Lee, C., "Evolution of Turbulent Structure in the Model Combustor Equipped with Turbulence Ring," 2007, ISABE-2007-1273