Research Paper
Journal of Aerospace System Engineering
Vol.13, No.1, pp.1-8 (2019)

ISSN 1976-6300
EISSN 2508-7150
http://dx.doi.org/10.20910/JASE.2019.13.6.1

LES을 이용한 후향 계단 유동에서의 Synthetic turbulence 효과 연구

안상훈[1]· 성홍계[2,†]

[1]한국항공대학교, 항공우주 및 기계공학과
[2]한국항공대학교, 항공우주 및 기계공학부

Synthetic Turbulence Effect in Subsonic Backward Facing Step Flow Using LES

Sang-Hoon Ahn[1] and Hong-Gye Sung[2,†]

[1]Department of Aerospace Engineering, Korea Aerospace University
[2]School of Aerospace and Mechanical Engineering, Korea Aerospace University

Abstract

The synthetic turbulence generation model for inlet boundary conditions of subsonic Backward Facing Step (BFS) was investigated. The average u-velocity and Reynolds stress at inlet boundary follows experimental data. Synthetic Eddy Method (SEM), random noise, and uniform flow conditions were implemented relative to the synthetic turbulence generation method. A three dimensional Large Eddy Simulation (LES) was applied for turbulent flow simulation. Turbulent and mean flow characteristics such as flow reattachment length, velocity profiles, and Reynolds stress profiles of BFS were compared with respect to the turbulent effects.

초 록

아음속 유동이 흐르는 후향 계단에서, 입구 경계면에서의 난류를 모사하는 3가지 기법을 조사하였다. 입구 경계면으로 유입되는 평균 유동장과 레이놀즈 응력 프로파일은 실험에서 측정된 결과를 사용하였으며, 입구 경계면의 난류 유동 모사기법으로 synthetic eddy method(SEM), 무작위 변동(random noise) 그리고 균일한 유동 조건(uniform)을 사용하였다. 3차원 유동장의 난류 유동의 모사를 위해 대와동모사(Large Eddy Simulation, LES)를 적용하였다. 3가지 기법에 대한 입구 경계면으로 유입된 유동의 난류 특성과 유동의 재 부착(reattachment) 거리와 속도, 레이놀즈 응력(Reynolds stress)을 비교하였다.

Key Words : Synthetic Eddy Method(SEM), Large Eddy Simulation(LES, 대와동모사), Backward Facing Step(BFS, 후향 계단)

Nomenclature

a	: Cholesky decomposition of the Reynolds stress tensor	f	: Velocity distribution
B	: Eddy box	H	: Energy flux
E	: Specific total energy	h	: Step height

Received: Jun. 10, 2019 Revised: Oct. 7, 2019 Accepted: Oct. 25, 2019
† Corresponding Author
Tel: +82-10-5275-9196, E-mail: hgsung@kau.ac.kr
Ⓒ The Society for Aerospace System Engineering

k	: Turbulent kinetic energy	ρ	: Density
l	: Eddy characteristic length	σ	: Viscous work
N	: The number of eddies	τ	: Viscous stress tensor
p	: Pressure	**Subscripts**	
R	: Reynolds stress tensor	o	: Freestream variable
S	: Inlet face	b	: Eddy box
T	: Temperature	con	: Convection
t	: Physical time	ijk	: Spatial coordinate index
u, v, w	: Velocity	min, max	: Minimum, Maximum value
V	: Volume	r	: Reattachment
x	: Spatial coordinate	**Superscripts**	
Greek symbols		s	: Eddy spot
δ	: Kronecker delta	sgs	: Subgrid-scale
ε	: Respective intensity	$\overline{(\ )}$	**:** Time average
λ	: Heat conductivity	$\tilde{(\ )}$	: Favre average

1. 서 론

입구 경계면에서 난류 특성은 해석적 관점에서 중요한 부분이다. 수치적 연구에서, 실험적 정보가 없는 경우에 입구 경계면에서 난류 특성을 모사해야 한다. 이에 따라, 입구 경계면에서 실제 현상과 유사한 난류 유동의 모사기법이 필요하다. 이를 위해서 사용되고 있는 기법들 중에는 무작위 변동, 프리커서 모사(Precursor simulation), 가우시안 필터(Gaussian filter), Proper-orthogonal 분해, SEM(synthetic eddy method) 등이 있다.

무작위 변동 기법의 경우, 수치해석에 적용하는 것이 용이하지만, 생성된 난류의 소산이 빠른 단점이 있다[1]. 프리커서 모사 기법은 난류 유동을 모사하는 것에 높은 정확도를 가지고 있으나, 입구 유동 방향의 시간적 변화가 크거나 경계층의 영향이 더해지는 경우에 한계를 보인다[2]. 가우시안 필터 기법은 균일하지 않은 난류 유동과 복잡한 형상에 적용하는데 적합하다[3]. Proper-orthogonal 분해 기법은 해석 도메인이 크고 일관성 있는 유동구조의 해석에 적용이 적절한 기법이다[4]. 즉, 프리커서 모사, 가우시안 필터, Proper-orthogonal 분해 기법은 특정 케이스에서는 매우 높은 적합도를 가지지만, 일반화하여 적용하는 것에 한계가 있다. 반면에 SEM의 경우, 수치해석에 적용하기에 용이하고, 계산 소요시간이 짧으며 다양한 유동과 형상에 적용이 가능하다는 장점을 가지고 있다[5].

Jarrin 등[5]은 SEM을 최초로 제안하였으며, 낮은 레이놀즈 수의 사각 수로 유동의 수치해석을 통해 SEM의 유효성을 검증하였다. 그리고 hybrid RANS/LES 수치해석에서 LES의 입구 경계면에 SEM을 적용하여 높은 레이놀즈 수의 영역에서도 효과적인 기법임을 제시하였다. Vedovoto 등[6]은 낮은 마하수의 유동이 흐르는 유로에서 반응/비반응 수치 연구를 수행하여, SEM이 계산 비용은 적게 들고 물리적인 현상을 잘 구현함을 확인하였다. Shin과 Sung[7, 8]은 스크램제트 엔진의 화염안정기 전에 SEM을 적용하여 실험과 유사한 난류 유동 분포를 얻을 수 있음을 제시하였다. Jovic 등[9]은 낮은 레이놀즈수 영역의 후향 계단에 대해서, 실험과 수치해석 연구를 수행하였다. 속도와 난류 운동 에너지의 프로파일을 측정하였으며, 계단 후방의 유동 비교에도 적절한 데이터들을 수집하였다. 본 연구의 해석 도메인은, 형상이 간단하고 난류 유동 특성을 관찰하기에 용이한 후향 계단 유동을 선택하여 Jovic 등의 실험 결과를 활용하였다.

SEM을 구현하여 입구 경계면에서 와동(eddy)의 생성을 확인하였으며, 무작위 변동과 균일 유동조건을 이용하여, 아음속 후향 계단 유동장에 대한 수치적 연구를 수행하였다.

2. 본 론

2.1 지배 방정식

3차원 Favre-averaged 질량, 운동량, 에너지 보존 방정식을 사용하였으며, 난류 유동을 모사하기 위해서 LES를 이용하여 격자보다 큰 와류는 직접 계산하고, 격자보다 작은 와류는 모델링을 하였다. 본 연구에서 해석할 BFS 케이스는, 압축성 효과가 적지만 추후 진행할 초음속 유동에 대한 연구를 위해서 압축성을 고려한 지배방정식을 사용하였다. 각각의 보존방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{\partial \bar{\rho}}{\partial t}+\frac{\partial \bar{\rho}\tilde{u}_i}{\partial x_i}=0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial \bar{\rho}\tilde{u}_i}{\partial t}+\frac{\partial(\bar{\rho}\tilde{u}_i\tilde{u}_j+\bar{p}\delta_{ij})}{\partial x_j}=\frac{\partial(\tilde{\tau}_{ij}-\tau_{ij}^{sgs})}{\partial x_j} \tag{2}$$

$$\begin{aligned}&\frac{\partial \bar{\rho}\tilde{E}}{\partial t}+\frac{\partial((\bar{\rho}\tilde{E}+\bar{p})\tilde{u}_i)}{\partial x_i}\\&=\frac{\partial}{\partial x_i}(\tilde{u}_j\tilde{\tau}_{ij}+\lambda\frac{\partial \tilde{T}}{\partial x_i}-H_i^{sgs}+\sigma_i^{sgs})\end{aligned} \tag{3}$$

여기에서, 상첨자 SGS 항은 sub-grid scale LES 난류 모델 항을 의미하며 Erlebacher 등[10]이 제안한 압축성 대수 Smagorinsky 모델을 적용하였고, 각 항은 아래와 같다.

$$\tau_{ij}^{sgs}=(\overline{\rho u_i u_j}-\bar{\rho}\tilde{u}_i\tilde{u}_j) \tag{4}$$

$$H_i^{sgs}=(\overline{\rho E u_i}-\bar{\rho}\tilde{E}\tilde{u}_i)+(\overline{p u_i}-\bar{p}\tilde{u}_i) \tag{5}$$

$$\sigma_i^{sgs}=(\overline{u_j\tau_{ij}}-\tilde{u}_j\tilde{\tau}_{ij}) \tag{6}$$

공간에 대해서 풍상차분법을 사용하였으며, 5차 Monotone Upwind Schemes for Scalar Conservation Laws (MUSCL)과 low-diffusion flux-splitting scheme (LDFSS)를 사용하였다. 시간 적분에 대해 3차 Total Variation Diminishing(TVD) 3-stage Runge-Kutta 기법을 사용하였다. 수렴성의 증대를 위해, 예조건화 기법을 사용하였다. 또한, 병렬처리 기법을 이용하여 계산의 효율성을 증대시켰다.

2.2 입구 난류유동 모사 기법

SEM은 입구 경계면을 포함하는 와동 상자(eddy box)를 정의하며, 와동 상자 내부에서 와동을 생성한다. 와동 상자는 다음과 같이 정의한다.

$$B=\{(x_1,x_2,x_3)\in R^3\}\quad (x_{i,min}<x_i<x_{i,max}) \tag{7}$$

여기에서, $x_{i,min}$과 $x_{i,max}$는 아래와 같다.

$$\begin{aligned}x_{i,min}&=\min_{x\in S}x_i-l(x))\\x_{i,min}&=\min_{x\in S}x_i-l(x))\end{aligned} \tag{8}$$

l은 와동의 특성 크기(Eddy characteristic scale)를 의미한다. Figure 1처럼 정의된 와동 상자 내부에 유한개의 와동 점(Eddy spot)을 정의한다.

정의된 와동 점에서, 속도 신호는 아래와 같다.

$$u_i=\bar{u}_i+\frac{1}{\sqrt{N}}\sum_{s=1}^{N}a_{ij}\varepsilon_j^s f_{l(x)}(x-x^s) \tag{9}$$

여기서, $\bar{u}_i$는 속도 신호가 정의되는 위치에서의 속도를 의미한다. N은 생성할 와동의 개수이고, a_{ij}는 레이놀즈 응력 텐서의 Cholesky 분해 항으로 Eq. (10)과 같다.

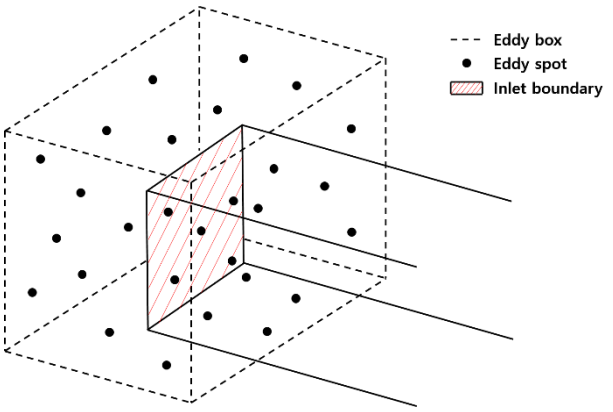


Fig. 1 Generation of eddy spot in eddy box

$$a_{ij}=\begin{pmatrix}\sqrt{R_{11}} & 0 & 0\\ R_{21}/a_{11} & \sqrt{R_{22}-a_{21}^2} & 0\\ R_{31}/a_{11} & (R_{32}-a_{21}a_{31})/a_{22} & \sqrt{R_{33}-a_{31}^2-a_{32}^2}\end{pmatrix} \tag{10}$$

ε_j^s는 랜덤 함수를 사용하여, 임의의 -1 또는 1의 값을 갖도록 하였으며, 강도를 의미한다. $f_{l(x)}(x-x^s)$는 x^s 와동 점에 대한 속도 분포를 나타낸다. 속도분포를 수식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}&f_{l(x)}(x-x^s)\\&=\sqrt{V_b}l^{-3}f\left(\frac{x_i-x_i^s}{l}\right)f\left(\frac{x_j-x_j^s}{l}\right)f\left(\frac{x_k-x_k^s}{l}\right)\end{aligned} \tag{11}$$

V_b는 와동 상자의 부피를 의미하며, f는 형상함수를 의미한다. 본 연구에서는 형상함수에 Tent 함수를 사용하여 구형의 와동을 생성하도록 하였다. Tent 함수의 정의는 아래와 같다.

$$f(x_i)=\begin{cases}\sqrt{\frac{3}{2}}(1-|x_i|), & if\ \ x<1\\ 0\quad , & otherwise\end{cases} \tag{12}$$

앞서 논한 Eq. (7)에서부터 Eq. (12)까지의 과정을 통해 와동 점을 중심으로 와동을 생성하게 된다. 와동 점들은 유동의 특성 속도로 일정하게 흘러가도록 정의되며, 흘러간 와동 점의 위치 변화를 수식으로 표현하면 다음과 같다.

$$x^s(t+dt)=x^s(t)+u_{con}dt \tag{13}$$

$x^s(t)$ 은 t 시간에 s 와동 점의 위치를 의미하며, u_{con} 은 와동 점이 흘러가는 속도이며, 유동의 특성속도로 정의된다. Figure 2와 같이, 와동 점의 위치가 와동 상자를 벗어나게 되면 임의의 위치에 와동 점을 새롭게 정의하여 위의 과정을 반복한다.

구현한 SEM의 결과를 확인하기 위해서 Otero[11]의 연구에 사용한, 가로와 세로가 2π x 2π 2차원 면을 이용하였다. 2차원 면을 통과하는 유동의 속도는 10 m/s이며, 와동의 개수(N)는 1000개이고, 와동의 특성 크기(l)는 0.5이다. Figure 3과 같이 구현된 SEM에서 와동 점이 정의되어 난류 유동이 생성되는 것을 관찰할 수 있다.

Figure 4는 2차원 면의 중심에서 시간에 따른 y 방향 속도의 변화(a, b)와 y 방향 속도 분포(c, d)를 Otero의 결과와 비교한 것이다. 모든 조건은 동일하였으며, 두 결과의 차이는 와동 점의 위치와 ε_j^s 의 값이 랜덤 함수를 통해 정의하기 때문에 발생한다. 시간에 따른 y 방향 속도 변화의 진폭과 주기성이 매우 유사한 것을 확인할 수 있으며, 속도분포 형상도 매우 비슷한 거동을 보인다.

더 나아가, 동일한 조건에서 무작위 변동을 적용한 결과는 Fig. 5이며, 무작위 변동의 시간에 따른 y 방향 속도의 변화(a)와 y 방향 속도분포(b)이다. SEM과 비교해서, y 방향 속도 변화의 진폭은 작고 주기 짧은 거동을 보인다. 이에 따라 y 방향 속도 분포도, 속도 변화폭은 작고 잘게 흩뿌려진 형상을 보인다. 이는 난류의 다양한 스케일을 모사하는 것의 한계를 의미한다.

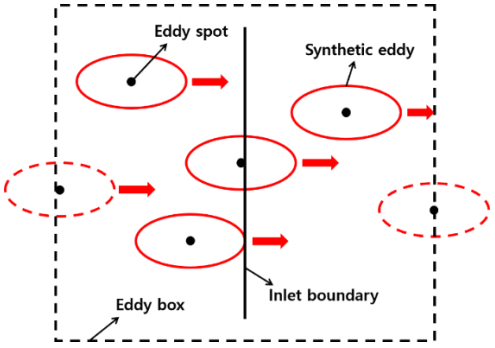


Fig. 2 Synthetic eddy convection

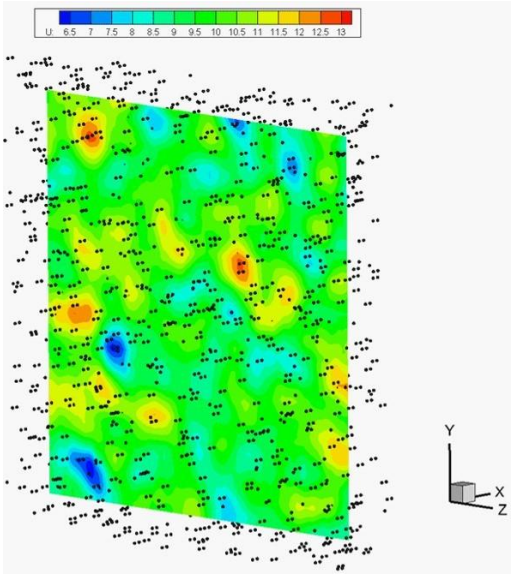
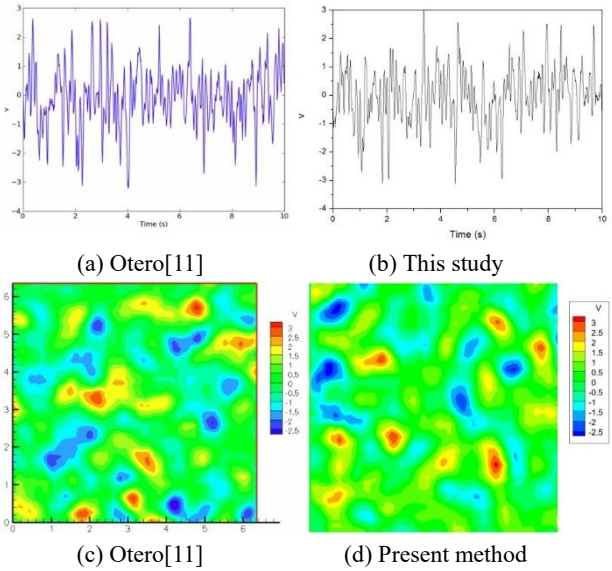


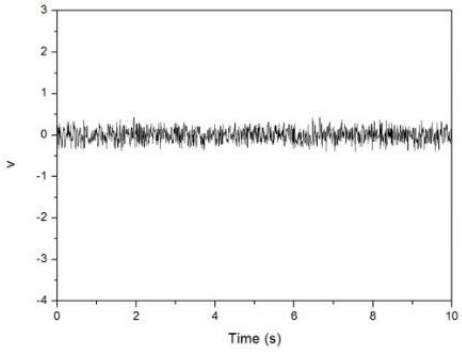
Fig. 3 Eddy spot convection and u-velocity contours



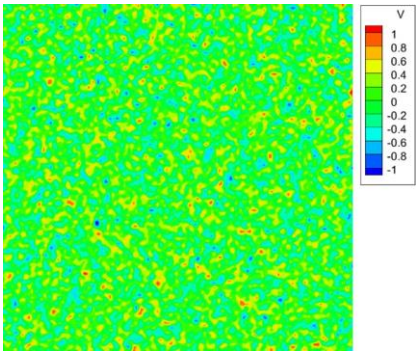
(a) Otero[11] (b) This study

(c) Otero[11] (d) Present method

Fig. 4 Time history of v-velocity(a, b) and v-velocity contours(c, d) at point (π , π)



(a)



(b)

Fig. 5 The results of random fluctuation, (a) Time history of v-velocity (b) v-velocity contours

2.3 격자 구성 및 해석 조건

계단의 높이(h)는 9.6 *mm*이고, 입구는 계단으로부터 3h, 출구는 계단으로부터 20h 하류에 위치한다. 계단 하류 영역의 높이는 6h 이고, 폭은 4h이다(Table 1). 좌우측 면과 윗면은 대칭이며 아랫면은 no-slip 벽면 조건을 주었다. 입구와 출구의 경계조건은 아음속 경계조건을 주었으며, 양측면과 상단의 면은 대칭 조건을 주었다. 아래의 면은 no-slip 조건을 주었으며, 시간 전진은 10^{-8} 초이다. 격자는 약 200 만개의 정렬 격자를 사용하였으며, 계산 효율의 증대를 위해서 46 개의 블록으로 구성하여, MPI (Massage Passing Interface) 병렬연산 기법을 적용하였다. 작동 유체는 상온, 상압의 공기를 사용하였으며, 자유 흐름(free stream)의 속도는 7.72 *m/s*이다.

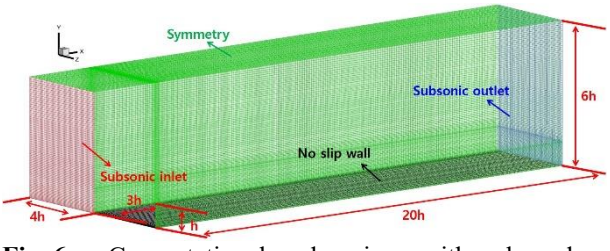


Fig. 6 Computational domain with boundary conditions and grid system

Table 1 Computational domain

Parameter	Dimension
Step height (*mm*)	9.6 (h)
Inlet boundary location	-3h (from step)
Outlet boundary location	20h (from step)
Height	6h
Width	4h

2.4 계산 결과

Figure 7과 같이 입구 유동은 후방 계단을 지나면서 전단면을 따라 확산되며, 아래 벽면에 재부착된다. 계단 후방과 재부착 위치 사이에 재순환 영역이 생성된다.

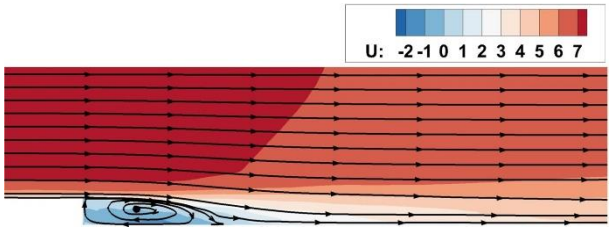


Fig. 7 Average u-velocity contours with streamlines using LES with SEM

Figure 8에 균일 유동(a), 무작위 변동(b), SEM(c) 조건의 계산 결과에서, 와도의 크기를 iso-surface로 나타내고, 속도의 크기를 색으로 도시하였다. 공통적으로 재순환 영역에서 작은 크기의 와류가 존재하고, 전단면 부근에서는 크기가 큰 와류가 지배적이다. Figure 9는 Fig. 8에서 계단 상류의 아래벽면 부근을 확대한 그림이다. 균일 유동 조건은 입구 경계조건 부근에서는 와류가 없고, 계단 쪽 하류로 흘러감에 따라서 벽면 효과로 인해 와류가 생성된다. 무작위 변동은 입구 경계조건에서부터 와류의 발생이 되지만 SEM 보다는 작은 와류가 생성이 되고, 벽면에 의해 와류가 발달된다. 그리고 SEM의 경우에는, 입구 경계조건에서부터 무작위 변동에 비해 큰 와류가 생성이 되며, 하류에 벽면 효과로 인한 와류의 발달을 확인할 수 있다.

이와 같은 차이는 입구 경계면에서 속도 변동의 실효 값을 통해서도 나타나며, 이를 Fig. 10에 정량화하였다. 균일 유동 조건의 경우에는, 입구 경계면의 속도 프로파일에 유동 변화가 없다. 무작위 변동의 경우에는 벽면 근처에서 약 ± 0.35 *m/s*의 진폭을 보이고, 벽면에서 떨어진 위치에서는 $\pm 0.01 - \pm 0.02$ *m/s*의 진폭을 보인다. SEM의 경우, 실험에서 측정된 속도 변동의 실효 값과 유사하게, 벽면근처에서는 약 ± 1.1 m/s 이상의 진폭을 보이고, 벽면에서 멀어지며 점차 줄어들어 0에 가까워진다. 이는 SEM이 실험에서 측정한 입구 위치의 유동을 적절하게 모사함을 의미한다.

입구를 통해 들어오는 유동의 난류 특성 비교를 위해서, Fig. 11에 표시된 지점에서 x, y, z 방향의 속도를 시간에 따라 수집하였다. 데이터 수집 지점들은 모두 도메인의 z축 상의 중앙(2h)에 위치하며, x축 방향으로 입구 경계면으로부터 첫 번째 셀과 1.5h이고, y축 방향으로는 아래 벽면의 첫번째 셀과 아래 벽면으로부터 2.5h에 위치하는 4개로 선정하였다.

Figure 12는 선정된 각 지점에서의 난류 운동에너지 스펙트럼을 고속 푸리에 변환(Fast Fourier Transform, FFT)을 통하여 표현한 그래프이다. ① 지점에서, 균일 유동 조건은 난류 운동에너지가 없고, 무작위 변동은 비교적 작은 크기의 난류 운동에너지가 생성이 되었으며, SEM은 가장 큰 난류 운동에너지를 생성하였다. ② 지점에서는 동일한 경향을 보였으나, 생성된 난류 운동 에너지의 크기가 작았다. 이는 Fig. 10의 결과와 동일한 경향을 보이고 있다. ①, ② 지점의 1.5h 하류에 위치한 ③, ④ 지점에서, 3가지 기법의 난류 운동에너지 분포가 $k^{-5/3}$ 의 기울기 경향을 보였으며 소산된 에너지는 Kolmogorov 스케일에서 열에너지로 변환되었다. 이는 난류 유동의 모사가 적절히 되었음을 의미한다. 균일 유동 조건의 경우, 입구 경계면에서는 존재하지 않던 난류 운동에너지가 벽면에서 발생된 난류가 하류로 흘러가며 생성된 것을 확인할 수 있다.

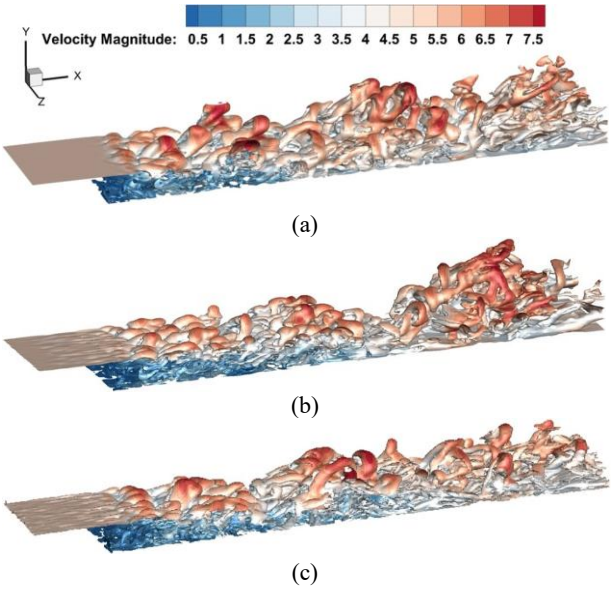
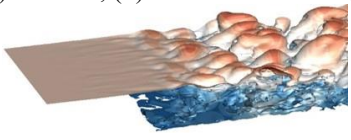


Fig. 8 Instant **i**so-surfaces of vorticity magnitude colored by velocity magnitude
(a) uniform, (b) random noise and (c) SEM



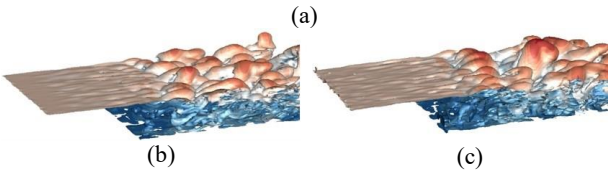


Fig. 9 Instant **i**so-surfaces of vorticity magnitude enlarged near the backward step; (a) uniform, (b) random noise and (c) SEM

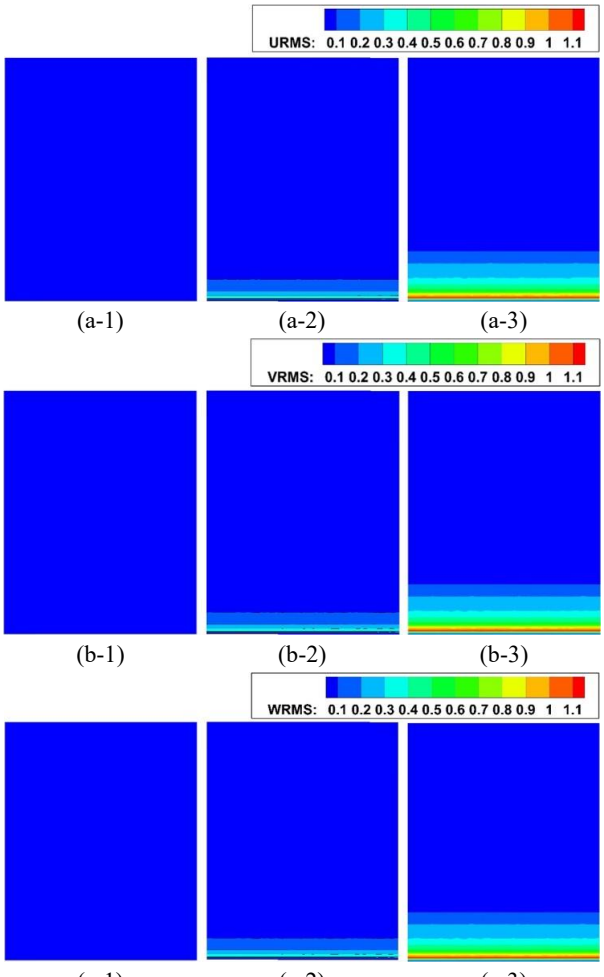


Fig. 10 RMS (u-rms(a), v-rms(b) and w-rms(c)) contours of uniform(a-1,b-1,c-1), random noise(a-2,b-2,c-2) and SEM(a-3,b-3,c-3) at inlet face:

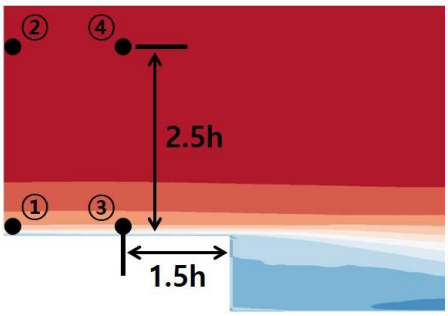
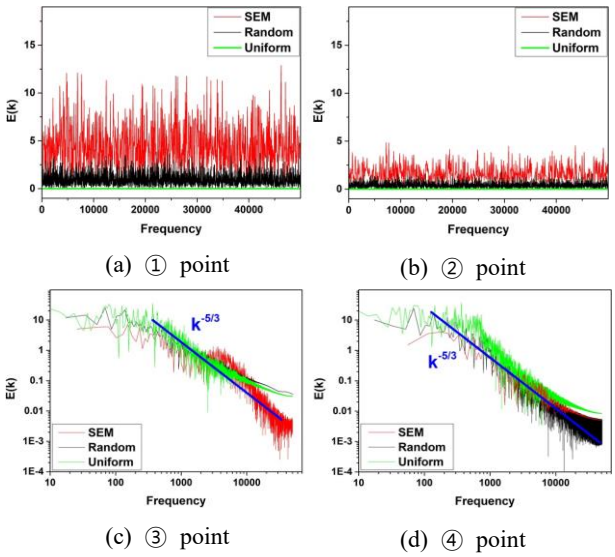


Fig. 11 Prob locations in step upstream



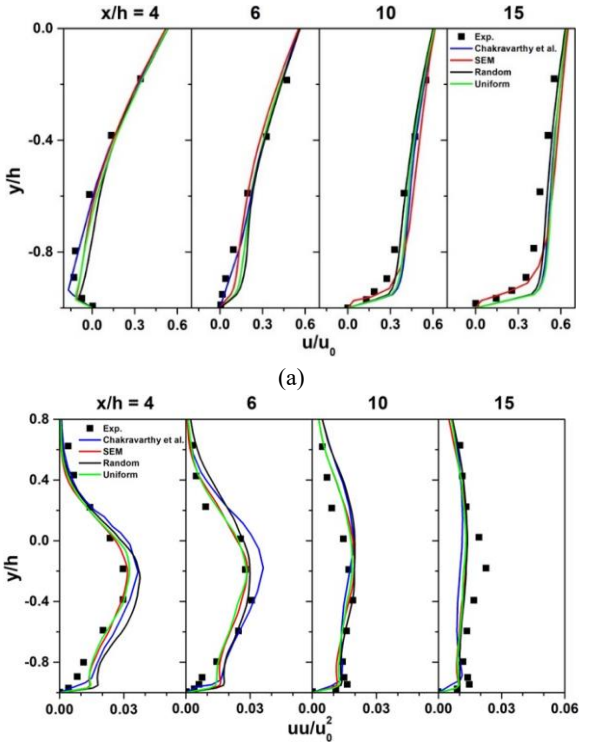
(a) ① point (b) ② point

(c) ③ point (d) ④ point

Fig. 12 Turbulent kinetic energy spectrum at respective points

속도와 레이놀즈 응력, 재 부착 거리는, 동일한 형상과 조건에서 디지털 필터(Digital filter) 기법을 이용해, 입구의 난류 유동을 모사하여 연구를 수행한 Chakravarthy 등[12]의 결과와 비교하였다.

Figure 13은 계단으로부터 x/h=4, 6, 10, 15의 위치에서 속도(a)와 레이놀즈 응력(b)을 나타낸다. Y 방향 길이는 계단의 높이로 정규화 하였으며, 속도와 레이놀즈 응력은 각각 자유 흐름 속도(u_0)와 자유 흐름 속도의 제곱(u_0^2)으로 정규화 하였다. U 방향 속도 프로파일(a)의 결과는 x/h=4, 6의 위치는 아래 벽면에서 Chakravarthy 등의 결과가 실험과 가까웠고, 자유 흐름 유동과 가까워질 수록 모든 결과가 실험과 유사하였다. x/h=10, 15의 위치에서는 SEM의 결과가 실험과 가장 유사한 결과를 보였다. Figure 13의 레이놀즈 응력 프로파일(b)의 결과는 전체적으로 SEM의 결과가 실험 데이터와 유사하였다. x/h=4 위치에서 무작위 변동과 Chakravarthy 등의 결과는, 실험 데이터 보다 큰 값을 보였으나 하류에서는 감소량이 크다. 이는 난류의 운동에너지가 빠르게 소산됨을 의미한다. SEM의 경우에는 x/h=15 위치에서 실험 측정값과 다소 차이가 있지만 난류 운동에너지의 유지에서 다른 결과보다 우수하였다.



(a)

(b)

Fig. 13 Comparison of u/u_0 profile (a) and uu/u_0^2 profile (b)

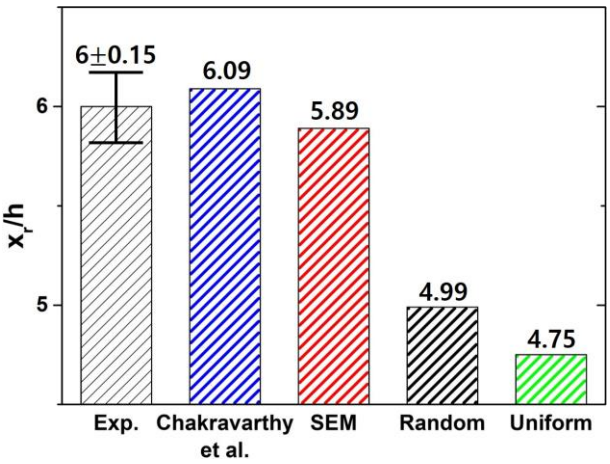


Fig. 14 Reattachment length comparison

재 부착 길이의 예측은 후향 계단 유동 문제에서 매우 중요하다. SEM, 무작위 변동, 균일 유동 조건의 수치 해석 결과에서, 재 부착 길이의 결과는 Fig. 14와

같다. Fig. 14에서, x_r 은 재 부착 길이를 뜻하며, 계단의 높이(h)로 정규화하였다. 재 부착 길이의 실험 측정 결과는 x_r/h=6이며, ± 0.15의 오차범위를 가지고 있다. SEM과 Chakravarthy 등의 결과 5.89와 6.09로, 실험의 오차범위 안에 드는 신뢰성 있는 결과를 보였다. 무작위 변동과 균일 유동 조건의 결과는 4.99와 4.75로 실험 측정 결과와 다소 차이가 났다.

3. 결 론

아음속 유동장의 후향 계단(BFS)에서, 입구 경계면의 난류 유동을 생성하는 기법과 효과에 대한 연구를 3차원 LES 기법을 적용하여 조사하였다. SEM, 무작위 변동, 균일 유동조건을 사용하였으며, 각 기법은 실험에서 측정된 입구 경계면에서의 속도 분포와 레이놀즈 응력 데이터를 기준으로 비교하였다.

난류 운동에너지 스펙트럼의 비교를 통해, 각 기법의 난류 모사가 적절히 되었음을 확인하였다. 그러나 와도 크기의 비교에서, 입구 경계면에서 생성되는 와류는 SEM, 무작위 변동, 균일 유동 조건 순으로 잘 나타났으며, 하류로 흘러 감에 따라서 벽면 효과로 와류가 발달하였다. 그리고 입구 경계면에서 속도 변동의 실효 값 비교를 통해, SEM의 결과가 실제 현상과 유사함을 확인하였다. 입구 경계면에서 실제 유동과 가장 우수하게 모사하였던 SEM의 결과는, 계단 하류의 속도와 레이놀즈 응력 프로파일 비교에서도 우수하였다. 재 부착 거리(x_r/h)의 결과는 균일 유동 조건이 4.75, 무작위 변동이 4.99, SEM이 5.89이며, SEM이 실험의 측정값의 오차 범위(6 ± 0.15)에 비해 신뢰성 있는 결과를 보였다.

이와 같은 결과를 통해, SEM이 입구 경계면에서 실제 유동과 유사한 유동을 모사함을 확인하였다. 그러나 현재 연구에 사용된 SEM은 벽면 효과에 대한 고려가 없어, 이에 관련한 연구들도 진행되고 있다[13]. 벽면 효과의 영향이 고려된다면, 보다 정확한 수치적 예측이 가능할 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 산업통상자원부 주관 항공우주부품 기술개발 사업(10050539, 2018-03-530)과 방위사업청 국방과학연구소 기초연구사업(2019-09-244, 2018-09-004)의 지원에 의해 수행 되었습니다.

References

[1] Jarrin, N., Benhamadouche, S., Addad, Y., Laurence, D. “Synthetic turbulent inflow conditions for large eddy simulation.” In: Proceedings, 4th International Turbulence, Heat and Mass Transfer Conference, Antalya, Turkey., 2003.

[2] Wim Munters, Charles Meneveau and Johan Meyers, "Turbulent Inflow Precursor Method with Time-Varying Direction for Large-Eddy Simulations and Applications to Wind Farms", Boundary-Layer Meteorol, Vol. 159, No. 2, pp. 305-328, 2016.

[3] Klein, M., Sadiki, A., Janicka, J., A “digital filter based generation of inflow data for spatially developing direct numerical or large eddy simulations.” Journal of Computational Physics, Vol. 186, pp. 652–665, 1997. .

[4] Druault, P., Lardeau, S., Bonnet, J. –P., Coiffet, F., Delville, J., Lamballais, E., Largeau, J. –F., Perret, L., “Generation of Three-Dimensional Turbulent Inlet Conditions for Large-Eddy Simulation”, AIAA Journal, Vol. 42, 2004.

[5] N. Jarrin, S. Benham douche, D. Laurence and R. Prosser, “A synthetic-eddy-method for generating inflow conditions for large-eddy simulations”, International Journal of Heat and Fluid Flow, Vol. 27, No. 4, pp. 585-593, 2006.

[6] Joao Marcelo Vedovoto, Aristeu da Silveira Neto, Luis Fernando Figueira da Silva and Arnaud Mura, “Influence of synthetic inlet turbulence on the prediction of low Mach number flows”, Computers & Fluids, Vol. 106, pp. 135-153, 2015.

[7] Junsu Shin, Hong-Gye Sung, “Combustion characteristics of hydrogen and cracked kerosene in a DLR scramjet combustor using hybrid RANS/LES method”, Aerospace Science and Technology, Vol. 80, pp. 433-444, 2018.

[8] Junsu Shin, Hong-Gye Sung, “Zonal Hybrid Reynolds-Averaged Navier–Stokes/Large-Eddy Simulation of a Hydrogen-Fueled Scramjet Combustor”, AIAA Journal, Vol. 56, No. 6, pp. 2322-2335, 2018.

[9] S. Jovic and D. M. Driver, “Backward-Facing Step Measurements at Low Reynolds Number, Reh=5000”, NASA Technical Memorandum 108807, 1994.

[10] G. Erlebacher, M. Y. Hussaini, C. G. Speziale, and T. A. Zang, “Toward the large-eddy simulation of compressible turbulent flows”, Journal of Fluid Mechanics, Vol. 238, pp. 155-185, 1992.

[11] Evelyn Otero, “Synthetic Inflow Condition for Large Eddy Simulation”, Royal Institute of Technology, School of Computer Science and Communication, 2009.

[12] Kalyana Chakravarthy, Konark Arora and Debasis Chakraborty, “Use of digitally filtered inflow conditions for LES of flows over backward facing steps”, European Journal of Mechanics / B Fluids, Vol. 67, pp. 404-416, 2018.

[13] B. Roidl, M. Meinke, W. Schroder, “A reformulated synthetic turbulence generation method for a zonal RANS-LES method and its application to zero-pressure gradient boundary layers”, International Journal of Heat and Fluid Flow, Vol. 44, pp. 28-40, 2013.