

# 합성난류경계층이 벽면에서의 변동압력에 미치는 영향

이영우\* · 이동섭\*\* · 신구균\*\* · 홍진숙\*\*\* · 임희창†

## Effects of Synthetic Turbulent Boundary Layer on Fluctuating Pressure on the Wall

Y.W. Yi\*, D.S. Lee\*\*, K.K. Shin\*\*, C.S. Hong\*\*\*, and H.C. Lim†

**Abstract** Large Eddy Simulation (LES) has been popularly applied and used in the last several decades to simulate turbulent boundary layer in the numerical domain. A fully developed turbulent boundary layer has also been applied to predict the complicated wake flow behind bluff bodies. In this study we aimed to generate an artificial turbulent boundary layer, which is based on an exponential correlation function, and generates a series of realistic three-dimensional velocity data in two-dimensional inlet section which are correlated both in space and in time. The results suggest its excellent capability for high Reynolds number flows. To make an effective generation, a hexahedral mesh has been used and Cholesky decomposition was applied to possess suitable turbulent statistics such as the randomness and correlation of turbulent flow. As a result, the flow characteristics in the domain and fluctuating pressure near the wall are very close to those of fully developed turbulent boundary layers.

**Key Words :** Turbulent Boundary Layer(난류경계층), Synthetic Inflow(인공입구유동), Channel Flow(채널유동), Fluctuating Pressure(변동압력), Corcos Model(코코스 모델)

### 기호설명

$u_i$  : 순간 속도 [m/s]

$\bar{u}_i$  : 평균 속도 [m/s]

$a_{ij}$  : 진폭 텐서 [m/s]

$\psi_j$  : 섭동 성분

$R_{ij}$  : 레이놀즈 응력텐서 [ $m^2/s^2$ ]

$Re_\tau$  : 마찰속도 레이놀즈수

$u_\tau$  : 마찰 속도 [m/s]

$d$  : 완전발달 난류 높이 [m]

$y^+$  : y plus

$\tau_w$  : 벽면전단응력 [ $N/m^2$ ]

$p'$  : 변동압력 [Pa]

$p_0$  : 기준 변동압력[Pa]

$\phi_p(0)$  : 기준 스펙트럼 값 [ $Pa^2 \cdot s$ ]

$\Delta\omega$  : 각주파수 변화량 [rad/s]

$U_C$  : 대류 속도 [m/s]

$U_\infty$  : 자유 유동 속도 [m/s]

$\Delta x$  : 인접한 두 점 사이의 거리 [m]

$\Delta\tau$  : 상호상관관계 최고점 사이의 거리(시간) [s]

LES : Large Eddy Simulation

DNS : Direct Numerical Simulation

\* School of Mech. Eng., Pusan Nat. Univ.,  
Ph.D Student

\*\* Agency for Defense Dev., Senior Researcher  
(D.S.Lee) and Principal Researcher (K.K.Shin)

\*\*\* School of Mech. Eng., Ulsan College, Professor

† School of Mech. Eng., Pusan Nat. Univ., Professor  
e-mail: hclim@pusan.ac.kr

## 1. 서론

난류경계층은 열과 물질을 전달하는 원리를 파악하는 것과 관련하여 기초과학 분야 뿐 아니라 다양한 응용분야에서 연구되어왔다<sup>(1-5)</sup>. 정확한 난류 경계층을 모델링 하는 것은 풍력발전기의 블레이드나 물과 같은 유체 내의 추진체와 같은 동적 구조물들을 설계하는 중요한 기반이 될 수 있다. 이러한 난류경계층을 수치 해석적으로 모사할 시, 불규칙적이고 무작위적인 유속 성분을 가진 실제 난류를 입구조건으로 넣어주는 것이 가장 이상적이다. 하지만, 대부분의 해석에서는 입구조건으로 평균유속이나 변하는 유속조건을 사용하여 동적 구조물과의 상호작용을 통한 후류유동을 확인하여왔다<sup>(6-7)</sup>. 이러한 방식은 완전한 난류경계층으로 발전시키기 위해 많은 시간과 고가의 수치 비용을 소모해야 한다는 문제가 있다. 현재는 이러한 문제를 해결하기 위해 합성법을 통해 만들어진 난류 유동을 입구 조건으로 사용하는 방식도 많이 연구되고 있다.

유동이 유체 내 구조물의 벽면과 상호작용하여 만들어지는 벽면에서의 변동압력들은 파동의 형태로 구조물 내부로 전달되어 유동유기 소음 및 진동을 일으키게 된다.<sup>(8-10)</sup> 이로 인한 구조물의 영향 및 소음으로 인한 환경적 영향을 확인하기 위해서는 벽면에서의 변동 압력 스펙트럼의 분석 및 모델링 과정이 필요하다. 이러한 변동 압력 스펙트럼의 모델링 기법에는 여러 가지가 있으며 본 연구에서 사용할 모델은 여러 모델들 중 가장 오랫동안 연구되어 왔던 코코스 모델이다.

본 연구에서는 합성난류경계층을 입구 조건으로 사용하는 경우의 해석 영역 내 난류유동의 특성을 관찰하고 이를 기존의 방식을 입구조건으로 사용한 경우와 비교하였다. 그리고 이를 통해 구한 대류 속도 및 난류응집성을 벽면에서의 변동 압력 스펙트럼을 모사하는 코코스 모델에 적용시킬 수 있는지를 확인하였다.

## 2. 수치해석 기법

### 2.1 유동지배방정식 및 입구유동장

본 연구에서는 무한 평판채널 난류경계층을 해석하기 전에 우선적으로 비압축성 유동 및 해석 영역 내 고해상도 분해능을 고려하였다. 그리고 해석 영역 내에서 실제와 유사한 난류경계층을 생성시키기 위해서는 DNS (Direct Numerical Simulation) 나 LES (Large Eddy Simulation)를 이용한 해석이 반드시 필요하다. 비용 및 시간 측면을 고려하여 본 연구에서는 LES를 사용하는 것이 적합하다 판단하였다.

#### 2.1.1 유동 지배방정식

해석 영역 내에서 직접 Navier-Stokes 방정식을 푸는 DNS 유동장과는 달리 LES 유동장의 지배방정식은 식 (1)과 (2)와 같이 공간에 대해 필터링이 된 비압축성 Filtered Navier-Stokes 방정식이다.

$$\overline{\frac{\partial u_i}{\partial x_i}} = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial t} + \overline{u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j}} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_j} + 2\nu \frac{\partial}{\partial x_j} \overline{S_{ij}} - \frac{\partial \tau_{ij}^r}{\partial x_j} \tag{2}$$

위 식과 같은 Filtered Navier-Stokes 방정식은 와류(eddy)가 해석영역 내 생성한 격자 필터보다 큰 경우의 계산에 사용이 된다. 격자 크기보다 작은 와류들의 경우에는 sub-grid scale model에 따라 계산이 진행된다. 본 해석에서는 Yoshizawa<sup>(11)</sup>가 제안한 k equation 모델을 사용하였다. 이 모델은 아래 식(3)과 같다.

$$\frac{D}{Dt}(\rho k) = \nabla \cdot (\rho D_k \nabla k) + \rho G - \frac{2}{3} \rho k \nabla \cdot \mathbf{u} - \frac{C_\epsilon \rho k^{1.5}}{\Delta} + S_k \tag{3}$$

#### 2.1.2 합성법 입구유동장

본 연구에서 설정되는 인공적인 난류유동장을 만들기 위해서는 실제의 난류 정보를 고려해야 한다. 보다 자세한 내용은 기존 논문<sup>(12)</sup>에 기술되어 있다. 여기서는 논문의 일부만 요약하였다.

도메인 내 생성되는 유속은 레이놀즈 분해 정리

(Reynolds decomposition theory)에 따라 식 (4)와 같이 평균 성분과 섭동 성분으로 분리가 된다.

$$u_i = \overline{u_i} + a_{ij}\Psi_j \quad (4)$$

여기서  $\overline{u_i}$ 는 평균속도,  $a_{ij}$ 는 진폭텐서,  $\Psi_j$ 는 섭동 성분으로 평균이 0이고 분산이 1이다. 본 해석에서는 식 (5)에서 볼 수 있듯이 Lund 등<sup>(13)</sup>이 제안한 레이놀즈 응력을 이용한 진폭텐서  $a_{ij}$ 를 사용하였다.

$$a_{ij} = \begin{pmatrix} \sqrt{R_{11}} & 0 & 0 \\ R_{21}/a_{11} & \sqrt{R_{22} - a_{21}^2} & 0 \\ R_{31}/a_{11} & (R_{32} - a_{21}a_{31}/a_{22}) & \sqrt{R_{33} - a_{31}^2 - a_{32}^2} \end{pmatrix} \quad (5)$$

식 (5)에 사용된  $R_{ij}$ 는 실험이나 수치해석 데이터로부터 얻은 레이놀즈 응력 텐서이다.

## 2.2 해석 영역 경계조건

본 연구에서는 해석을 진행할 영역으로 정방격자계(hexahedral grid system)를 사용하였으며, 이는 효율적인 난류유동 수치해석이 가능하기 때문이다. 벽면 근처에 격자를 집중하여 경계층 생성에 의한 벽면 근처 와류 에디(vortex eddy)의 해상도를 높이고자 하였다. 본 연구에서 사용한 마찰속도 레이놀즈수( $Re_\tau=395$ )는 매끈한 벽면에서의 마찰 속도( $u_\tau$ )와 채널의 절반 높이( $d$ )를 이용하여 도출되었다. 본 유동의 경계조건으로는 상부와 하부 벽면에 점착조건(no-slip condition), 측면에는 주기(periodic) 조건을 사용하였다. 입구 조건으로는 사용자가 원하는 속도 조건을 부여할 수 있는 속도 입력조건을 사용하고, 출구 조건에는 제로 구배(zero gradient) 조건을 사용하여 모든 유동 변수들이 확산하지 않도록 하였다. 해석에 사용된 전체 영역 크기는  $20\pi d \times 2d \times \pi d$ 이며, 여기서 각 성분들은 순서대로 유동, 수직, 수평 방향이다. 수렴이 가능한 수치해석을 위하여 생성된 격자의 수는 약 190만개이고 해당 격자에 대한 해석 영역은 Fig. 1과 같다. LES 기반의 해석 수렴성을 고려하여 벽면 인근에서의  $y^+$ 가 1에 근접하도록 격자를 생성

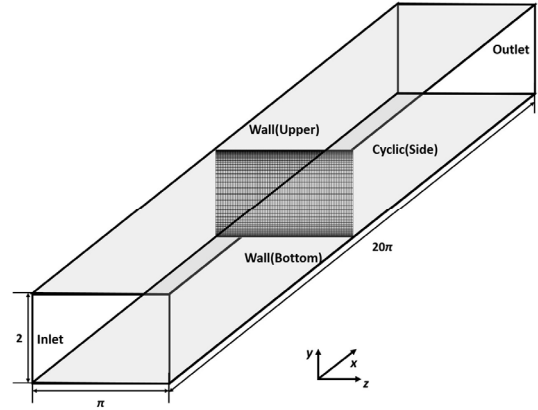


Fig. 1. Schematics of computational channel domain(No. of mesh :  $500 \times 46 \times 82$ ).

하였다. 또한 x와 z의 방향에 대한 무차원화 된 격자 크기는  $\Delta x^+ = 45$ ,  $\Delta z^+ = 15$ 를 설정하였다.

## 3. 결과 및 토의

### 3.1 난류유동특성

본 연구에서 사용한 합성유동난류경계층이 실제 난류와 얼마만큼의 유사성을 가지고 있는지 확인하고자 하였다. Fig. 2에서 볼 수 있듯이 입구 영역으로 들어간 유동이 벽면근처와 대수경계층(logarithmic layer) 영역 모두에서 DNS 데이터 및

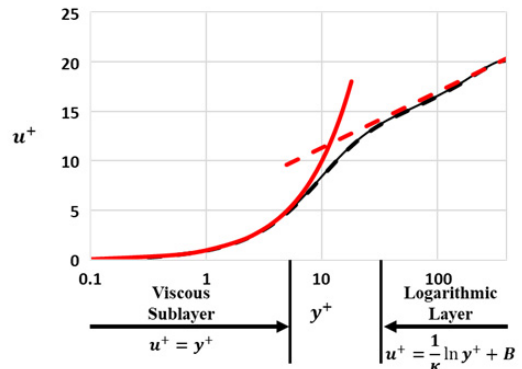


Fig. 2. Comparison of  $u^+$  among DNS data<sup>(14)</sup>, Synthetic inflow data, and theoretical results(black solid line : DNS data, black dashed line : Synthetic inflow data, red solid line : Law of the Wall, red dashed line : Logarithmic Law).

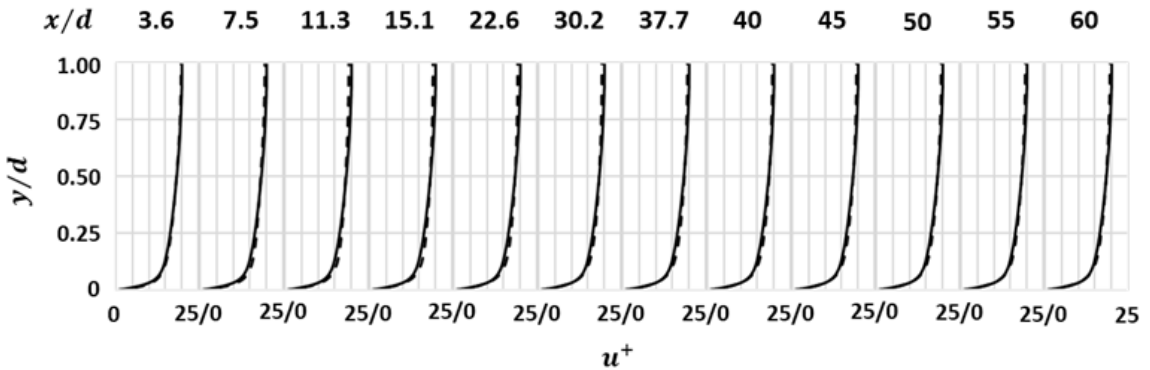


Fig. 3. Comparison of  $u^+$  among DNS data<sup>(10)</sup> and the cases of synthetic inflow data(Black solid line : DNS data, black dashed line : Inflow data).

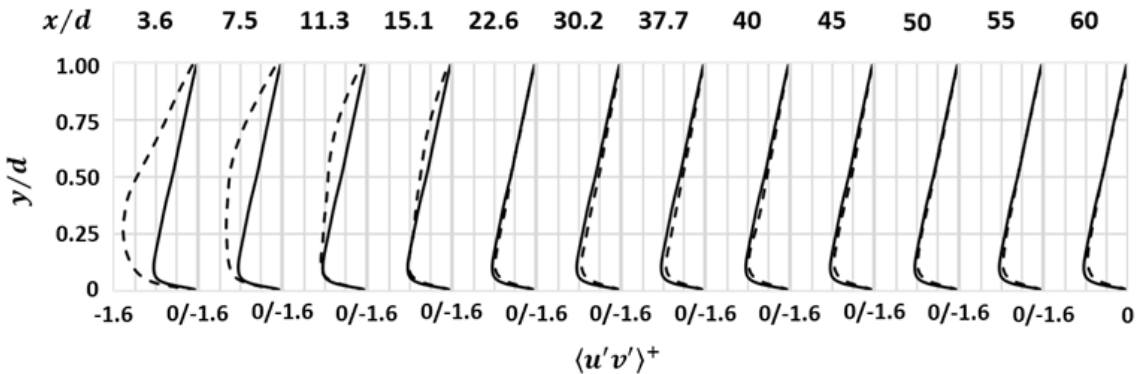


Fig. 4. Comparison of  $\langle u'v' \rangle^+$  among DNS data<sup>(10)</sup> and the cases of synthetic inflow data(Black solid line : DNS data, black dashed line : Inflow data).

이론값과 거의 유사하다는 것을 확인할 수 있다.

기존의 방식인 해석 영역의 출구에서의 난류 유동 데이터를 입구의 데이터로 이용하는 순환 조건(periodic condition)을 입구 조건으로 사용하는 경우에는 Lee 등<sup>(15)</sup>이 지적했던 것처럼 벽면에서부터 난류경계층이 점차적으로 발달하게 된다. 이러한 방식으로 해석 영역 내에서 난류경계층이 발달하므로 난류경계층 발달에 많은 시간이 소요되며, 어느 위치에서 완전히 발달되었다고 이야기하기 어려운 경우가 많다.

반면 합성법으로 만든 난류경계층을 입구조건으로 사용하는 경우에는 기존의 방식과는 다르게 해석 영역 내부에서 유동이 순환하지 않으므로 난류가 완전히 발달한 위치를 판별할 수 있다.

Fig. 3과 4는 유동이 어느 위치에서 완전히 발달

되었는지를 확인하기 위해 DNS 데이터와 합성 유동을 통해 만든 유동데이터를 확인한 것이다.

Fig. 3에서 볼 수 있듯이  $u^+$ 로는 위치( $x/d$ )에 따른 유동의 특성 변화를 확인하기 어렵다.

Fig. 4에서는 특히  $x/d$ 가 22.6 이상일 경우에는 DNS와 LES의  $\langle u'v' \rangle^+$  분포가 서로 일치하게 발달하였다. 이는  $x/d=22.6$ 에서 난류경계층이 완전 발달한 것으로 보인다. 이는 기존 합성법으로 입구 유동장을 만든 Kim 등<sup>(16)</sup> 예측 결과인  $x/d=30$  보다 약 20%이상 빠르게 발달한 것을 보여주었다. 또한,  $x/d$ 가 22.6이내의 영역에서는 DNS 데이터와 합성유동을 통해 만든 난류유동 사이에 차이가 나타나고 있으며, 이는 상류 해석 영역 내에서는 천이영역에 속하며, 난류경계층이 완전히 발달되지 않은 것으로 판단된다.

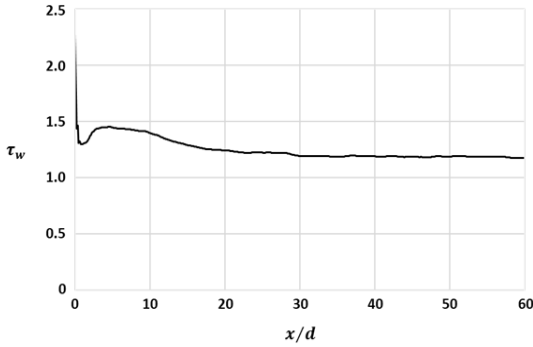


Fig. 5. Wall shear stress along the streamwise location.

이를 통해 평균속도( $u^+$ )보다 전단응력( $\langle u'v' \rangle^+$ )이 유동의 발달과정을 확인하는데 더 적합하다는 것을 알 수 있었다.

Fig. 5는 입구에서의 거리에 따른 벽면전단응력을 나타낸 것이다.  $x/d=3$  이전까지 급격히 변하던 벽면전단응력이 난류경계층이 성장함에 따라 안정되어가는 경향을 보인다. 그리고  $x/d=30$  이후 거의 일정해지는 것을 확인할 수 있다.

### 3.2 벽면변동압력특성

본 연구에서는 난류 경계층과 벽면 사이의 상호작용에 의해 발생하는 변동압력의 특성을 확인하고자 하였다. 변동압력 분석을 통해 산출되는 대류속도( $U_c$ )와 난류응집성(Coherence)은 벽면에서의 변동 압력 스펙트럼과 관련된 유동소음(flow-induced noise)과 진동을 모델링하고 검증하는데 사용되는 기초자료로서 활용된다. 이러한 모델링에 가장 오랫동안 연구되었던 모델인 코코스모델은 식 (6)과 같다.

$$\phi_{pq}(\zeta, \eta, \omega) = \phi_{pp}(\omega) e^{-\alpha \frac{\omega}{U_c} |\zeta|} e^{-\beta \frac{\omega}{U_c} |\eta|} e^{-j \frac{\omega}{U_c} \zeta} \quad (6)$$

여기서,  $\phi_{pq}$ 는 두 점 사이에서의 상호 벽면 압력 스펙트럼,  $\phi_{pp}$ 는 한 점에서의 벽면 압력 스펙트럼,  $U_c$ 는 대류속도이다. 그리고  $\zeta$ 와  $\eta$ 는 두 점 사이의 유동방향 및 유동에 수직인 방향으로의 거리이고,  $\alpha$ 와  $\beta$ 는 각각 유동방향 및 유동에 수직인 방향으

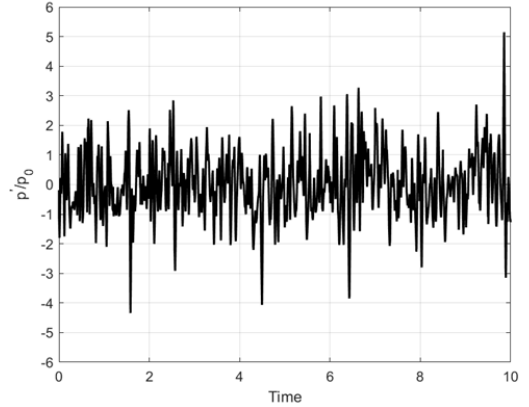


Fig. 6. Temporal fluctuating pressure variation at  $x/d=30$ .

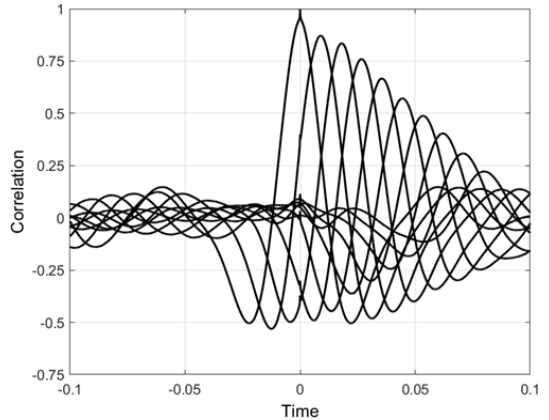


Fig. 7. Cross correlation of fluctuating pressure along streamwise location.

로의 감쇠비(decay rate)이다.

본 연구에서는 Fig. 5에서 볼 수 있듯이 벽면전단응력이 일정해지는  $x/d=30$  이상인 위치에서부터 벽면 근처의 변동압력을 사용하였다.

Fig. 6은  $x/d=30$ 에서의 시간에 따른 벽면변동압력의 변화를 나타낸 것이다. 대부분의 데이터 추출 시간 동안 벽면변동압력이 복잡한 난류특성을 보이는 것을 확인할 수 있었다. 벽면에서의 변동압력은 대부분의 시간 동안 일정한 범위(-2~2) 안에 있는 것을 알 수 있었다. 하지만 변동압력의 크기가 순간적으로 일정한 범위를 벗어나는 현상이 관찰되었는데 이는 Kim 등<sup>(17)</sup>이 보고하였던 벽면난류의 버스팅 현상(Bursting event)에 의한 것이라 판

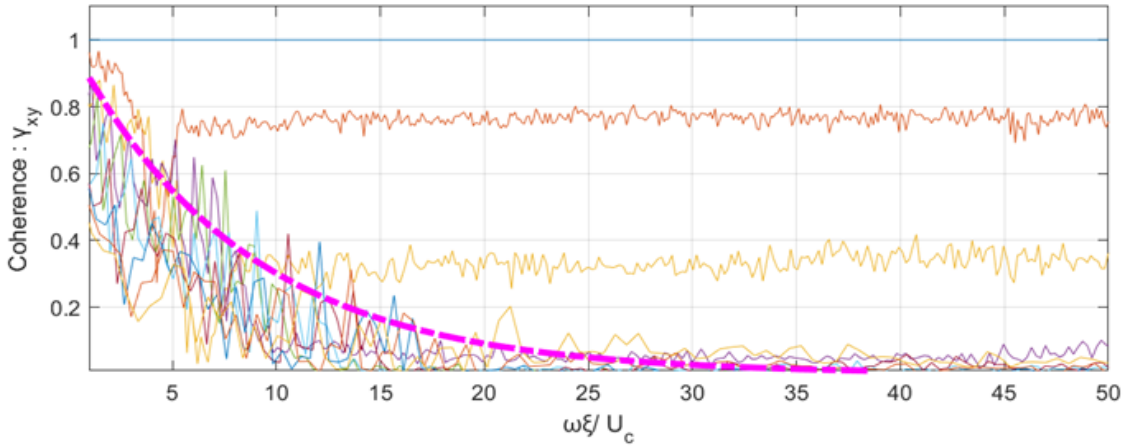


Fig. 8. Coherence of fluctuating pressure along streamwise location.

단된다. 이 때  $p_0$ 는 식 (7)과 같이 변동압력을 푸리에 변환했을 때 0 Hz 에서의 스펙트럼 값인 기준 스펙트럼 값  $\phi_p(0)$ 과 각주파수 변화량  $\Delta\omega$ 을 통해 구한 기준 변동압력이다.

$$p_0 = \sqrt{\phi_p(0) \times \Delta\omega} \quad (7)$$

Fig. 7은 유동방향의 2점 사이의 상호상관관계(cross correlation)를 나타낸다. 상호상관관계를 통해 대류속도(Convection velocity)  $U_c$ 를 구할 수 있는데 이는 식 (8)과 같다.

$$U_c = \frac{\Delta x}{\Delta\tau} \quad (8)$$

이때  $\Delta x$ 는 인접한 두 점 사이의 거리,  $\Delta\tau$ 는 Fig. 7을 통해 확인할 수 있듯이 두 상호상관관계선의 최고점 사이의 거리(시간)이다. 식 (6)에 따라 계산된 대류 속도는 14.1 m/s로 이 난류경계층의 자유 유동 속도인 19.7 m/s의 약 72%로 기존의 연구결과<sup>(18)</sup>와 잘 부합함을 알 수 있었다.

두 점 사이의 상호상관관계를 통해 둘 사이의 난류 응집성(coherence)을 구할 수 있다. Fig. 8은 무차원화된 주파수와 난류응집성 사이의 관계를 나타낸다. Fig. 8에서 볼 수 있듯이 난류 응집성은 주파수가 커짐에 따라 지수 함수형으로 감소하는 경향을 보인다. 본 연구에서의 감쇠비는 0.06 이었다.

이는 이전의 연구에서 제안하였던 유동방향 난류 응집성<sup>(10)</sup> 특성과 유사함을 알 수 있다.

Fig. 6에서도 볼 수 있듯이 대부분의 경우 변동압력의 크기가 일정 범위 안에 있지만 한 번씩 일정 범위를 벗어나는 경우를 확인할 수 있었다. 이러한 것은 Fig 7과 Fig 8에서 확인할 수 있는 노이즈로 생각된다. 이는 계산 시에 발생하는 오차나 LES 모델에 사용한 sub-grid scale 모델에 의한 것으로 판단된다.

#### 4. 결론

정확한 난류경계층을 모델링 하는 것은 유체 내 추진체와 같은 동적 구조물의 설계 시 중요한 기반이 되므로 정확한 난류유동특성에 대한 정보는 필수적이다. 따라서 본 연구에서는 LES를 이용하여 무한채널 내 해석 영역에서 난류를 더욱 빠르게 발달시키기 위해 합성법(synthetic method)으로 생성한 입구조건을 사용하였다. 합성법으로 만든 입구조건의 유동 응답특성을 이론 및 기존의 연구결과와 비교하고, 이 때 벽면응답특성을 보고자 벽면에서의 변동압력의 특성을 확인하였다.

본 연구결과를 요약하면 아래와 같이 정리할 수 있다.

1. 합성법(synthetic method)은 실제 난류경계층을 생성하기에 적합한 방법이며, 그 유동특성도 기존의 연구결과와 잘 부합하였다.

2. 수치해석 영역 내 전단응력( $\langle u'v' \rangle^+$ )은 유동의 완전발달을 평가하는 적합한 지표로 사용할 수 있다.

3. 합성법으로 만든 입구조건이 벽면 응답특성은 기존의 연구결과와 어느 정도 유사성을 가졌다.

## 후 기

본 논문의 주요 내용은 국방과학연구소의 지원을 받아 수행되었습니다(UD190002DD).

## REFERENCE

- 1) Kovaszny, L. S., 1970, "Turbulent Boundary Layer", Annual Review of Fluid Mechanics, Vol. 2(1), pp. 95~112.
- 2) Willmarth, W. W., 1975, "Pressure Fluctuations beneath Turbulent Boundary Layers," Annual Review of Fluid Mechanics, Vol.7(1), pp. 13~38.
- 3) Kline, S. J., Reynolds, W. C., Schraub, F. A., and Runstadler, P. W., 1979, "The structure of turbulent boundary layers," Journal of Fluid Mechanics, Vol.30(4), pp. 741~773.
- 4) Sreenivasan, K. R., 1989, "The turbulent boundary layer," Frontiers in experimental fluid mechanics. Springer, Berlin, Heidelberg, pp. 159~209.
- 5) Kline, S. J. and Robinson, S. K., 1990, "Quasi-coherent structures in the turbulent boundary layer. I-Status report on a community-wide summary of the data," Near-wall turbulence, pp. 200~217.
- 6) Lim, H. C., 2007, "Flow Structure on the Roof of a Cube Placed in a Turbulent Boundary Layer," J. Wind Eng. Ins. Korea, Vol. 11(2), pp. 153~159.
- 7) Kim, J. H., Jeong, S. W., Ahn, B. K., Park, C. S., and Kim, G. D., 2018, "Numerical Analysis of Unsteady Cavitating Vortex around Two-dimensional Wedge-shaped Submerged Body", Journal of Ocean Engineering and Technology, Vol. 32(1), pp. 36-42.
- 8) Kim, J. N. and Sung, H. J., 2006, "Wall pressure fluctuations and flow-induced noise in a turbulent boundary layer over a bump", Journal of fluid mechanics, Vol. 558(10), pp. 79~102.
- 9) Shin, K. K. and Hong, C. S. and Lee, H. G., 1996, "A study of Flow Induced Noise for Multilayered Cylinder due to Turbulent Boundary Layer", Journal of KSNVE, Vol. 6(5), pp. 671~677.
- 10) Hong, C. S., Shin, K. K., and Kim, S. Y., 2001, "A Modelling of Structural Excitation Forces Due to Wall Pressure Fluctuations in a Turbulent Boundary Layer", Journal of KSNVE, Vol. 11(2), pp. 226-233.
- 11) Yoshizawa, A., 1986, "Statistical theory for compressible turbulent shear flows, with the application to subgrid modeling", The Physics of fluids, Vol. 29(7), pp. 2152~2164.
- 12) Lee, Y. T. and Lim, H. C., 2017, "Effect of Inflow Length Scales on the Generation of Turbulent Boundary Layer Flow", J. Wind Eng. Ins. Korea, Vol. 21(4), pp. 171~178.
- 13) Lund, T. S., Wu, X., and Squires, K. D., 1998, "Generation of turbulent inflow data for spatially-developing boundary layer simulations", Journal of Computational Physics, Vol. 140(2), pp. 233~258.
- 14) Moser, R. D., Kim, J., and Mansour, N. N., 1999, "Direct numerical simulation of turbulent channel flow up to  $Re_\tau = 590$ ", Physics of fluids, Vol. 11(4), pp. 943-945.
- 15) Lee, Y. T., Gutti, L. K., and Lim, H. C., 2021, "Numerical Study of the Influence of the Inlet Turbulence Length Scale on the Turbulent Boundary Layer", Applied Sciences, Vol. 11(11), pp. 1-23.
- 16) Kim, Y. S. and Castro, I. P., and Xie, Z. T., 2013, "Divergence-free turbulence inflow conditions for large-eddy simulations with incompressible flow solvers", Computers & Fluids, Vol. 84, pp. 56-68.
- 17) Kim H., Kline, S. J., and Reynolds, W. C., 1971, "The production of turbulence near a smooth wall in a turbulent boundary layer", Journal of Fluid Mechanics, Vol. 50(1), pp. 133-160.
- 18) Del Alamo, J. C. and Jiménez, J., 2009, "Estimation of turbulent convection velocities and corrections to Taylor's approximation", Journal of Fluid Mechanics, Vol. 640, pp. 5-26.