

Improved Delayed DES 해석을 통한 돔 형상의 풍압 계수 및 풍압 스펙트럼 산정

Wind Pressure Coefficients and Spectrum Estimation of Dome by Improved Delayed Detached Eddy Simulation

박범희*
Park, Beom-Hee

전두진**
Jeon, Doo-Jin

한상을***
Han, Sang-Eul

Abstract

In this study, the reliability of the analysis is evaluated by comparing the average wind pressure coefficient, RMS wind pressure coefficient and wind pressure spectrum with same condition of wind tunnel test which are calculated in the high-Reynolds number range of 1.2×10^6 , 2.0×10^6 each for the typical curved shape dome structure. And it is examined by the reliability of analysis through Improved delayed detached Eddy Simulation(IDDES), which is one of the hybrid RANS/LES techniques that can analyze the realistic calculation range of high Reynolds number. As a result of the study, it was found that IDDES can be predicted very similar to the wind tunnel test. The distribution pattern of the wind pressure coefficient and wind pressure spectrum showed a similar compared with wind tunnel test.

Keywords : IDDES, Hybrid RANS/LES, Dome, Wind pressure, Wind pressure spectrum

1. 서론

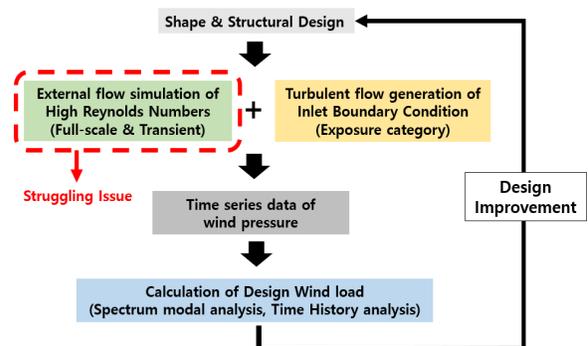
1.1 연구의 배경

구조물의 설계 풍하중을 산정할 때 형상에 기인하여 발생하는 풍압 또는 풍력의 변동 특성은 구조 시스템의 불안정성과 관련하여 중요하게 고려해야 할 사항이다. 특히 형상비가 큰 초고층 건축물이나 가벼운 유연 대공간 구조물의 경우 타 구조물에 비해 외류에 의해 발생하는 변동 풍력 또는 변동 풍압이 진동과 같은 공역학적 불안정 현상을 초래할 가능성이 매우 높다.

국내외 설계 기준은 공기역학적 불안정성이 예상되는 유연 구조물의 경우 경계층 풍동 실험을 통해 구조물에 작용하는 풍하중의 특성을 파악하여 적절

한 설계 풍하중을 산정하도록 지시하고 있다. 하지만 축소 모형을 통한 풍동 실험은 실제 크기의 구조물과의 유동 유사성을 완전히 일치시키지 못한다는 한계점이 존재한다. 특히 실험 모형과 실제 구조물의 레이놀즈수 불일치 문제는 곡면으로 이루어진 구조물에 작용하는 풍하중의 명확한 산정을 더욱 어렵게 만드는 요인이다.

이러한 풍동 실험의 한계점을 보완하기 위해 국내외에서 전산 유체 역학(CFD)을 통해 구조물의 풍하중을 산정하려는 시도가 계속되어 왔다. 과거 정상

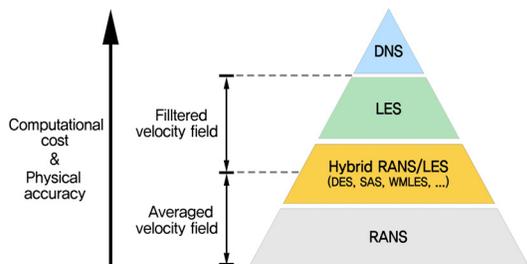


<Fig. 1> Wind resistance design process using CFD

* 학생회원, 인하대학교 건축공학과, 공학석사
Dept. of Architectural Engineering, Inha University
** 학생회원, 인하대학교 건축공학과, 박사과정
Dept. of Architectural Engineering, Inha University
*** 교신저자, 정회원, 인하대학교 건축공학과 교수, 공학박사
Dept. of Architectural Engineering, Inha University
Tel: 070-8269-3656 Fax: 032-866-4624
E-mail: hsang@inha.ac.kr

상태(Steady-state)의 가정을 통한 기본적인 풍압 분포의 사례 연구 단계에서 시간 이력 해석을 통한 비정상 상태(Transient-state) 해석으로 풍하중을 직접적으로 산정하는 단계로 넘어가고 있다. <Fig. 1>은 CFD를 통한 내풍 설계의 전체적인 과정을 나타낸다. 구조물의 설계 풍하중을 산정하기 위해서는 지표면 조도에 따른 난류 유입부의 적절한 모사와 높은 레이놀즈수를 가진 실스케일 건물의 정확한 유동 해석이 전제되어야 한다. 하지만 높은 레이놀즈수를 가진 유동 해석에 따른 계산량의 증대 문제로 여전히 많은 연구가 진행되고 있다.

높은 레이놀즈수 유동에 대한 효율적인 해석 기법으로써 다양한 Hybrid RANS/LES 기법이 제안되었다. 이는 비교적 적은 수의 격자로 난류 유동을 효율적으로 계산할 수 있는 장점을 가지고 있다. <Fig. 2>에서 볼 수 있듯 Hybrid RANS/LES 기법은 RANS와 LES의 중간 단계로써 LES 기법에 비해 계산량이 적으며 RANS 기법보다 난류 유동의 모사 능력이 뛰어나다. 이에 따라 Hybrid RANS/LES 기법을 통해 구조물의 평균 및 변동 풍하중을 산정하려는 연구가 늘고 있는 추세이다. 하지만 해외 연구의 사례를 보면 레이놀즈수에 따라 유동 양상이 크게 변하지 않는 각주 형상을 대상으로 한 수치적 연구가 대다수이며, 유동과 레이놀즈수의 독립성이 보장되지 못한 곡면 형상에 대한 수치적 연구는 아직 부족한 실정이다.



<Fig. 2> Characteristics of turbulent models

1.2 연구의 목적

본 연구는 CFD를 내풍 설계에 직접적으로 적용하기 위한 전 단계의 연구이다. Hybrid RANS/LES를 통한 곡면 구조물의 외부 유동 해석이 어느 수준

의 신뢰도를 갖는지 검토하는 것에 초점을 두었으며, 풍동 실험¹⁾과 동일한 조건에서 돔 형상을 대상으로 해석을 진행하였다.

돔 형상은 대공간 구조물의 대표적인 형상이자 곡면 구조로써 유동 박리점이 명확하지 않기 때문에 레이놀즈수에 따라 풍압의 분포 양상이 변하는 특징을 가지고 있다. 또한 임계 레이놀즈수 이상의 ($10^6 \sim 10^7$) 범위를 가진 돔에 대한 풍동 실험 값이 선행된 연구를 통해 존재하기 때문에 해석의 신뢰성을 검토하기에 매우 적합한 형상이다.

해석 기법으로는 Hybrid RANS/LES 기법 중 가장 대표적인 Improved Detached Eddy Simulation (IDDES)을 사용하였다. 2개의 레이놀즈수를 가진 돔 형상에 대해 비정상 상태 해석을 수행하여 돔 외부의 평균 풍압 계수, 변동 풍압 계수 및 풍압 스펙트럼을 산출하여 실험값과 비교하였다.

2. 이론적 배경

2.1 Detached Eddy Simulation (DES)

Detached Eddy Simulation은 Spalart et al. (1997)에 의해 처음 제안되었으며 가장 잘 알려진 Hybrid RANS/LES 기법이다²⁾. 해당 기법은 격자의 크기와 난류 스케일(Turbulent length scale)을 기준으로 RANS와 LES를 교체하여 해석하는 방식이며, 일반적으로 다음과 같은 수식으로 표현된다.

$$\text{If } C_{DES} \Delta_{max} > L_t, \quad \text{activate RANS}$$

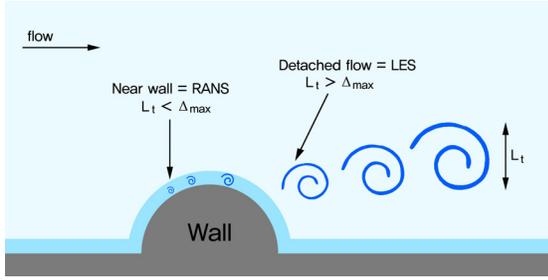
$$\text{If } C_{DES} \Delta_{max} \leq L_t, \quad \text{activate } \leq \text{LES}$$

$$\Delta_{max} = \max(\Delta_x, \Delta_y, \Delta_z)$$

$$L_t = \text{turbulent length scale}$$

$$C_{DES} = 0.65 \text{ (경험적 상수)}$$

이는 <Fig. 3>과 같이 매우 작은 난류 스케일을 가진 벽면 근처의 유동은 RANS로 해석되고, 비교적 큰 난류 길이 스케일을 갖는 벽면에서 이탈된 유동에 대해서는 LES로 해석됨을 의미한다.



〈Fig. 3〉 Concept of Detached Eddy Simulation (DES)

2.2 Improved Delayed DES (IDDES)

DES에서 발생했던 GIS (Grid Induced Separation)의 문제와 LLM (Log-Layer Mismatch)의 문제를 개선하기 위해 DDES³⁾와 WMLES (Wall Modeled LES)를 혼합한 형태인 IDDES가 제안되었다⁴⁾.

IDDES 기법에서 수송 방정식의 소산항 내 길이 스케일은 다음과 같은 식에 의해 전환된다.

$$D_k = \frac{\rho k^{3/2}}{l_{Hybrid}}$$

$$l_{Hybrid} = \tilde{f}_d(1 + f_e)l_t + (1 - \tilde{f}_d)C_{DES}\Delta_{IDDES}$$

길이 스케일의 계산에 혼합 함수 f_B 와 상승 함수 f_e 를 도입하여 기존의 DDES를 WMLES로 기능하게 하며, 두 함수는 다음과 같다.

$$f_B = \min[2e^{-9\alpha^2}, 1.0], \quad \alpha = 0.25 - \frac{d}{\Delta}$$

$$f_e = \max[(f_{e1} - 1), 0]f_{e2}$$

$$f_{e1} = \begin{cases} 2e^{-11.09\alpha^2} & (\alpha \geq 0) \\ 2e^{-9\alpha^2} & (\alpha < 0) \end{cases}$$

$$f_{e2} = 1 - \max(f_t, f_l)$$

$$f_t = \tanh[(C_t^2 r_{dt})^3], \quad f_l = \tanh[(C_l^2 r_{dl})^{10}]$$

$$r_{dt} = \frac{\nu_t}{\sqrt{\nabla \mathbf{v} : \nabla \mathbf{v}^T} \kappa^2 d^2}$$

$$r_{dl} = \frac{\nu}{\sqrt{\nabla \mathbf{v} : \nabla \mathbf{v}^T} \kappa^2 d^2}$$

WMLES와 DDES의 분기점은 다음과 같은 수정

된 형태의 \tilde{f}_d 를 통해 결합된다.

$$\tilde{f}_d = \max((1 - f_{dt}), f_B)$$

$$f_{dt} = 1 - \tanh[(C_{dt} r_{dt})^3]$$

또한 IDDES에서 사용되는 격자 스케일은 다음과 같이 계산된다.

$$\Delta_{IDDES} = \min(\max(0.15d, 0.15\Delta, \Delta_{min}), \Delta)$$

3. 수치 해석

3.1 형상 및 해석 조건



〈Fig. 4〉 Hemispherical pressure models in smooth flow wind tunnel¹⁾

Cheng & Fu(2010)는 지름 1.2m, 높이 0.6m의 돔을 대상으로 14개의 서로 다른 유속을 가진 균등류 (Smooth flow)에 대한 풍동 실험을 진행하였다¹⁾. 〈Fig. 4〉는 풍동 및 돔 형상의 모습이다. 풍동의 폐쇄율은 5.4%로 경계층 효과의 최소화를 위해 바닥면을 띄운 상태에서 진행되었으며, 200개의 풍압 계측 센서를 통해 돔 외부의 풍압을 계측하였다.

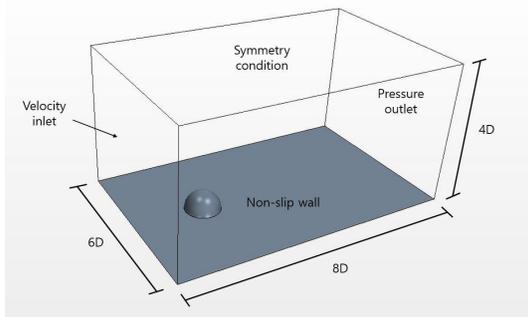
본 연구에서 실험과 동일한 조건으로 지름 1.2m의 돔 형상을 대상으로 15m/s와 25m/s의 균등류에 대한 해석을 수행하였다. 돔의 지름을 특성 길이라 할 때의 레이놀즈수는 각각 1.2×10^6 , 2.0×10^6 이다. 〈Table 1〉은 각 케이스에 따른 공기의 유속, 밀도, 동점성 계수, 특성 길이로 정의된 돔의 레이놀즈수를 나타낸다.

<Table 1> Physical factor of two cases

	Case 1	Case 2
Wind velocity	15 m/s	25 m/s
Density	1.225 kg/m ³	
Dynamic viscosity	1.8375 × 10 ⁻⁵ kg/m s	
Diameter	1.2 m	
Reynolds number	1.2 × 10 ⁶	2.0 × 10 ⁶

도메인은 돔의 지름을 기준으로 8D×6D×4D의 크기를 가진 직육면체로 설정하였다. 후류에 의한 와류 방출 효과 등이 풍압의 변동에 미칠 영향을 충분히 재현하기 위해 돔의 중심은 속도의 유입구를 기준으로 2D만큼 떨어지게 배치하여 충분한 후류 영역을 확보하였다.

<Fig. 5>는 해석 도메인의 모습을 나타낸다. 폐쇄율은 약 1.6%이며, 도메인의 경계 조건으로 돔과 바닥면은 Non-slip 조건을 부여하였고, 속도 유입면과 유출면을 제외한 모든 면에 Symmetry 조건을 부여하였다.



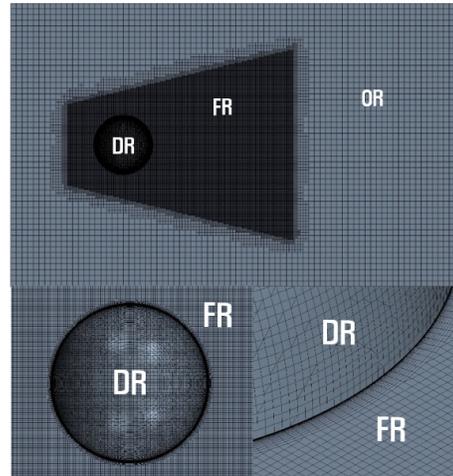
<Fig. 5> Domain and boundary conditions

3.2 해석 격자 및 계산 조건

해석 격자는 Spalart(2001)가 제시한 방법에 따라 전체 도메인 영역을 Dome Region (DR), Focus Region (FR), Outer Region (OR)로 분류하여 생성하였다⁵⁾. <Table 2>는 세 영역에서의 격자 크기 및 생성된 총 격자의 수를 나타내며, <Fig. 6>은 생성된 격자의 모습이다.

<Table 2> Grid size and number of cells

	DR	FR	OR	No. of cells
Case 1	D/120	D/100	D/12	3.2 million
Case 2	D/160	D/100	D/12	3.9 million



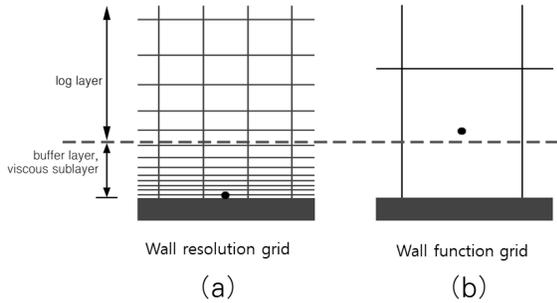
<Fig. 6> Figure of grid division

Dome Region은 $y^+ \leq 1$ 과 벽면 법선 방향으로의 작은 신장률(Stretch ratio)을 유지시키기 위해 정렬 격자(Prism layer mesh)를 사용하여 1.15의 신장률로써 Focus Region과의 경계 부분에서 격자 크기에 급격한 변동이 없도록 연결되었다.

Focus Region의 격자는 대부분 작고 균등한 등방성 격자(Isotropic mesh)를 사용하였다. 이는 LES로 해석될 후류 영역의 격자 크기를 변하게 하는 필터 스케일 변화로 인한 수치적 오류를 방지하기 위함이다. 상대적으로 돔과 멀리 떨어진 Outer Region은 해석의 효율성을 위해 비교적 큰 크기의 등방성 격자로 구성하였다.

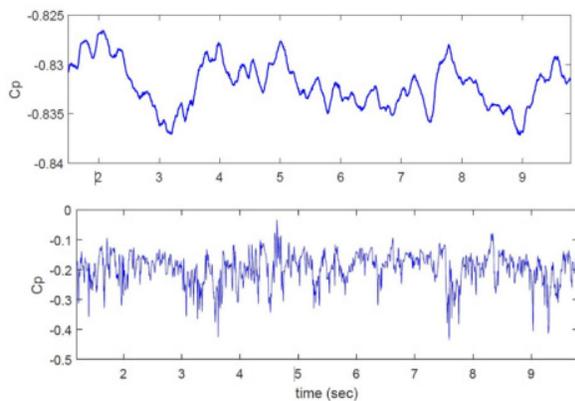
돔 표면의 격자는 $y^+ \leq 1$ 의 점성저층(Viscous sub-layer)에 위치시켰다. 바닥면 격자는 로그 영역(Log-layer)인 $30 \leq y^+ \leq 500$ 범위에 위치시켜 벽 함수(Wall function)를 통해 해석되도록 하는 Wall function approach를 적용하였다<Fig. 7>.

유사한 사례로 Paik & Sotiropoulos(2012)와 Gritskevich, Garbaruk & Menter(2017)는 DES를 통한 유동 해석에서 벽 함수를 적용하였고 전체적인 유동에는 큰 영향을 주지 않는 것으로 보고되었다^{6),7)}.



〈Fig. 7〉 (a) Modeled wall, (b) Wall function approach

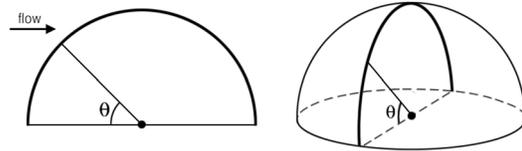
RANS 기법을 통해 계산된 정상 상태(Steady-state)의 평균 유동을 초기 조건으로 사용하였다. 시간 증분(Time step)은 $5.0 \times 10^{-4} s$ 의 일정한 값으로 설정하였다. 이산화는 Implicit second-order scheme을 통해 진행되었으며, 시간 증분에 따른 반복 계산에서 해석 도메인의 전체 유동에 따른 운동량과 난류 운동 에너지(Turbulence kinetic energy)에 대한 Residual이 0.1% 이하(Normalized residual= 10^{-4})가 되도록 최소 8번의 반복 계산을 통해 이루어졌다. 총 2.4만개의 시간 증분으로 해석을 수행하였고, 과도기를 고려하여 처음 2초의 시간을 해석 시간에서 제외하여 총 10초의 평가 시간을 통해 결과 값을 도출하였다. 〈Fig. 8〉은 계산된 돔 표면의 시간 이력 데이터 예시이다.



〈Fig. 8〉 Time history data of wind pressure coefficient ($Re = 2.0 \times 10^6$)

4. 해석 결과

4.1 풍압 계수

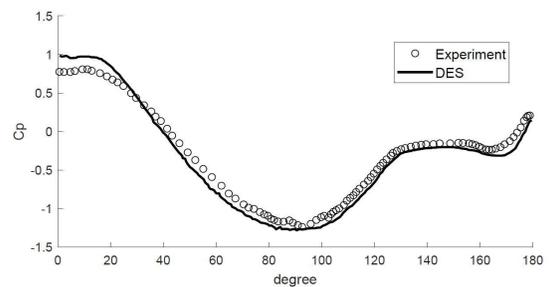


〈Fig. 9〉 Angle definition of dome

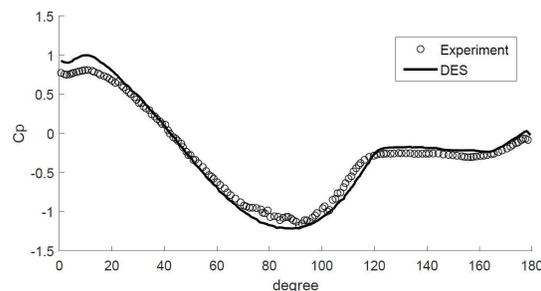
〈Fig. 9〉는 풍동 실험과의 비교를 위해 구의 중심을 지나며 유동 방향과 평행한 면에 대한 각도로 정의된 로컬 좌표계를 나타낸다. 돔 표면의 평균 풍압 계수 C_p 와 변동 풍압 계수 C_p' 는 다음과 같다.

$$C_p = \frac{P}{\frac{1}{2} \rho U_{ref}^2} \quad C_p' = \frac{\Delta P_{rms}}{\frac{1}{2} \rho U_{ref}^2}$$

여기서 ρ 는 공기의 밀도, U_{ref} 는 유속, ΔP_{rms} 는 변동 풍압의 rms값이다.

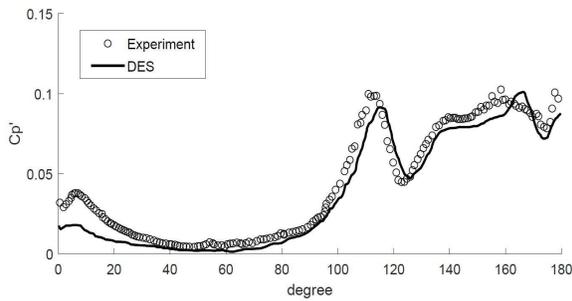


(a) $Re = 1.2 \times 10^6$

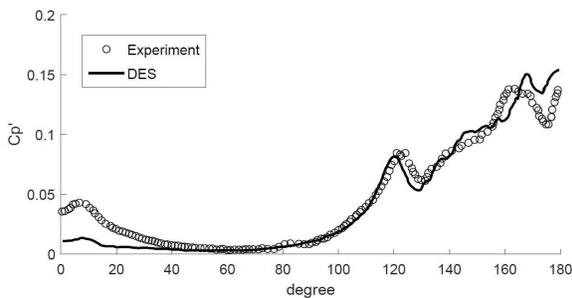


(b) $Re = 2.0 \times 10^6$

〈Fig. 10〉 Comparison of wind pressure coefficients with experiment¹⁾



(a) $Re = 1.2 \times 10^6$



(b) $Re = 2.0 \times 10^6$

<Fig. 11> Comparison of wind pressure fluctuation coefficients with experiment¹⁾

IDDES를 통해 산정된 평균 풍압 계수와 변동 풍압 계수는 특정 구간에서 값 자체의 과대 또는 과소 평가가 있으나 대부분의 구간에서 실험값과 유사한 값과 양상을 가진다.

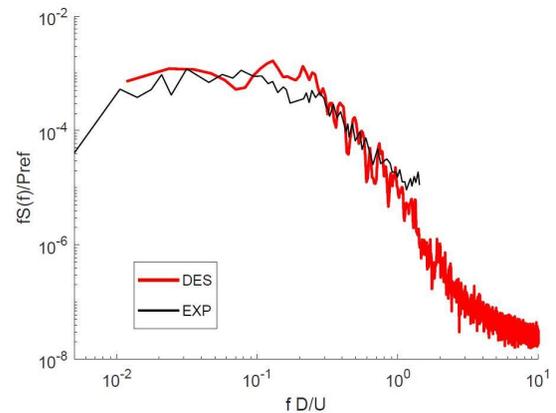
구간 $40^\circ < \theta < 160^\circ$ 에서는 실험값과 미소한 값의 차이를 가지며 풍동 실험과 유사한 분포를 보여준다. <Fig. 10>의 평균 풍압 계수 분포를 보면 음의 값을 갖는 부압 계수가 90° 부근에서 최대를 가지는 양상 및 90° 이후 $120^\circ \sim 130^\circ$ 구간에서 $dC_p/d\theta = 0$ 에 가까워지며 풍압 계수가 일정하게 유지되는 양상 등이 잘 반영되고 있다.

<Fig. 10>과 <Fig. 11>의 $\theta < 40^\circ$ 구간에서 평균 풍압 계수와 변동 풍압 계수의 분포에 다소 차이가 있음을 알 수 있다. 이는 도메인 바닥에 대한 Wall function의 사용에 따른 해석적 오차로 인한 것으로 추정된다. 본 연구에서는 해석의 효율성을 위해 바닥면의 격자를 로그 영역(Log-layer)에 위치시켜 벽 함수에 의해 바닥면을 해석하였다. 이는 실제 지표면의 경계층 효과에 의해 발달된 난류가 해석으로 충분히 재현되지 못함을 의미하므로 풍상측 평균

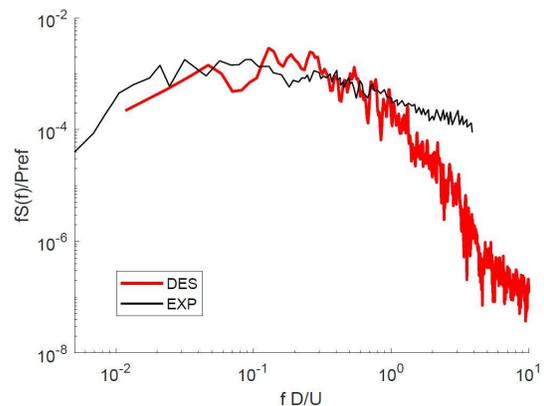
풍압 분포의 과대평가와 변동 풍압 계수의 과소평가가 나타난 것으로 판단된다.

수반된 오차에도 불구하고 주목할 점은 IDDES를 통한 해석이 레이놀즈수에 따라 변하는 평균 풍압 계수 및 변동 풍압 계수의 전체적인 분포 양상을 만족할 수준으로 반영한다는 것이다. 특히 $dC_p/d\theta = 0$ 인 박리점의 이동, $Re = 2.0 \times 10^6$ 의 후류 구간 변동 풍압 계수 감소와 같이 레이놀즈수의 변화에 따라 달라지는 풍압의 특성이 수치 해석에 의한 결과에 잘 드러나고 있음을 알 수 있다.

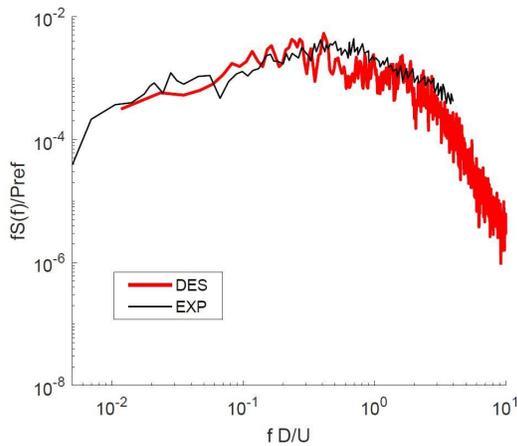
4.2 풍압 스펙트럼



<Fig. 12> Wind pressure spectrum before flow separation ($Re = 2.0 \times 10^6$)⁸⁾



<Fig. 13> Wind pressure spectrum of flow separation point ($Re = 2.0 \times 10^6$)⁸⁾



(Fig. 14) Wind pressure spectrum after flow separation ($Re = 2.0 \times 10^6$)⁸⁾

$Re = 2.0 \times 10^6$ 을 가진 돔의 유동에서 박리점 이전(약 $\theta = 100^\circ$), 박리점 주변(약 $\theta = 115^\circ$), 박리점 이후(약 $\theta = 160^\circ$)에 대한 세 점의 풍압 스펙트럼을 비교하였다. <Fig. 12>의 박리점 이전 구간과 <Fig. 14>의 박리점 이후 구간에서는 IDDES에 의해 구해진 스펙트럼의 분포가 실험값과 매우 유사한 양상을 보인다. 유동 박리 전 $10^{-2} \sim 10^{-1}$ 사이의 낮은 진동수 영역에 분포되어 있던 스펙트럼이 박리 이후 상대적으로 높은 진동수 영역으로 이동함을 볼 수 있다. 그러나 <Fig. 13>과 같이 박리점 근방에서의 스펙트럼 분포는 실험값과 다소 차이를 보였다. 이는 <Fig. 10 (b)>에서 볼 수 있듯 IDDES에 의해 구해진 $dC_p/d\theta = 0$ 인 점이 실험보다 약 4° 정도 지연되었고 해당 각도에서 완전한 박리가 일어나지 않았기 때문인 것으로 추정된다. 박리 이후 난류 유동에 의해 발생하는 고진동수의 풍압 변화가 해석상 일어나기 전이기 때문에 무차원 진동수 $fD/U = 10^0 \sim 10^1$ 영역에서 스펙트럼의 과소평가의 결과가 나온 것으로 사료된다.

5. 결론

본 연구에서는 Improved delayed DES 기법을 사용하여 돔 표면의 풍압 계수 및 풍압 스펙트럼을 산정하였다. 이를 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

1) IDDES을 통해 구해진 돔 표면의 평균 풍압과 변동 풍압 분포는 실험값과 유사한 결과를 보여준다. 특히 레이놀즈수 변화에 따른 박리점의 이동 및 후류 영역에서의 변동 풍압 계수 감소와 같은 특징을 잘 예측하고 있음을 알 수 있다.

2) IDDES 해석에 의해 계산된 변동 풍압의 파워 스펙트럼은 전체적인 분포가 실험과 유사하나, 유동 박리(Flow separation)가 일어나는 국소적인 구간인 $\theta = 120^\circ$ 근방에서 실험값과 차이를 보인다. 또한 고진동수 영역인 $fD/U = 10^0 \sim 10^1$ 에서 해석에 의한 스펙트럼이 실험값에 비해 과소평가되는 경향을 보였다. 이는 IDDES를 통한 해석상의 유동 박리가 실험에 비해 다소 지연되는 결과에 의한 것으로 판단된다.

추후 내풍 설계 기준 평가 시간을 고려한 유동 해석 및 난류 유입구의 재현을 통한 풍하중 산정 연구가 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부도시건축사업의 연구비지원(19AUDP-B100343-05)으로 수행되었습니다.

References

1. Cheng, C. M., & Fu, C. L., "Characteristic of wind loads on a hemispherical dome in smooth flow and turbulent boundary layer flow", Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol.98, No.6-7, pp.328~344, 2010
2. Spalart, P. R., Jou, W. -H., Strelets, M., & Allmaras, S. R. (1997). Comments on the Feasibility of LES for Wings, and on a Hybrid RANS/LES Approach. Proceedings of the 1st AFOSR International Conference on DNS/LES, USA, pp.137~148
3. Spalart, P. R., Deck, S., Shur, M. L., Squires, K. D., Strelets, M. K., & Travin, A., "A New Version of Detached-eddy Simulation,

- Resistant to Ambiguous Grid Densities", Theoretical and Computational Fluid Dynamics, Vol.20, No.3, pp.181~195, 2006
4. Shur, M. L., Spalart, P. R., Strelets, M. K., & Travin, A. K., "A hybrid RANS-LES approach with delayed-DES and wall-modelled LES capabilities", International Journal of Heat and Fluid Flow, Vol.29, No.6, pp.1638~1649, 2008
 5. Spalart, P. R. (2001). Young-Person's Guide to Detached-eddy Simulation Grids (Report No. NASA/CR-2001-211032). USA: National Aeronautics and Space Administration. Retrieved from <https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20010080473.pdf>
 6. Paik, J., & Sotiropoulos, F., "DES of turbulent flow over wall-mounted obstacles using wall functions", KSCE Journal of Civil Engineering, Vol.16, No.2, pp.189~196, 2012
 7. Gritskevich, M. S., Garbaruk, A. V., & Menter, F. R., "A Comprehensive Study of Improved Delayed Detached Eddy Simulation with Wall Functions", Flow, Turbulence and Combustion, Vol.98, No.2, pp.461~479, 2017
 8. Fu, C. L., Cheng, C. M., Lo, Y. L., & Cheng, D. Q., "LES simulation of hemispherical dome's aerodynamic characteristics in smooth and turbulence boundary layer flows", Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol.144, pp.53~61, 2015

- Received : November 05, 2019
- Revised : December 02 2019
- Accepted : December 09, 2019