

라이즈-스팬 비에 따른 개폐식 돔 지붕의 외장재 설계용 피크순압력계수

Peak Net Pressure Coefficients for Cladding Design of Retractable Dome Roofs according to Rise-Span Ratio

천 동 진*
Cheon, Dong-Jin

김 용 철**
Kim, Yong-Chul

Abstract

In this study, the characteristics of wind pressure distribution on circular retractable dome roofs with a low rise-to-span ratio were analyzed under various approaching flow conditions by obtaining and analyzing wind pressures under three different turbulent boundary layers. Compared to the results of previous studies with a rise-to-span ratio of 0.1, it was confirmed that a lower rise-to-span ratio increases the reattachment length of the separated approaching flow, thereby increasing the influence of negative pressure. Additionally, it was found that wind pressures varied significantly according to the characteristics of the turbulence intensity. Based on these experimental results, a model for peak net pressure coefficients for cladding design was proposed, considering variations in turbulence intensity and height.

Keywords : Dome roof with opening, Rise-span ratio, Peak net pressure coefficient model, Cladding

1. 서론

최근 밀폐형 돔 지붕과 비교해 환기, 자연광의 유입 등의 효과로 에너지 효율성이 높고 날씨로부터 자유로운 운영이 가능한 개폐식 돔 지붕의 수요가 증가하고 있다. 이러한 개폐식 돔 지붕은 장경간의 구조와 가벼운 구조로 인해 구조물의 유연성 향상과 낮은 질량으로 인해 풍하중에 민감하다. 또한 대공간 구조물은 대기경계층 높이보다 낮게 구성되기 때문에 강한 돌풍과 높은 난류강도에 노출되어 지붕 주변의 유동 패턴은 복잡해진다. 그리고 지붕을 여닫음에 따라 달라지

는 가변적인 지붕의 형상은 주변 유동 패턴을 더욱 복잡하게 한다^{1,2)}.

상대적으로 많은 선행연구가 진행된 밀폐형 돔 지붕은 다양한 변수에 따라 달라지는 지붕 주변의 유동 패턴에 따른 풍압 분포의 특성이 반영된 풍하중 기준이 정립되어 있지만, 개폐식 돔 지붕에 대한 풍하중을 유추할 수 있는 기준은 없는 실정이다. 이에 최근 개폐식 돔 지붕의 외장재 설계용 풍하중을 유추하기 위한 선행연구가 진행되고 있다. Kim et al.(2019) 및 Lee et al.(2022)는 원형 및 타원 평면의 단부 개방형 개폐식 돔 지붕을 대상으로 풍동실험을 통해 외장재 설계용 피크외압계수를 제안하였으며, Lee et al.(2022)은 타원 평면의 중심 개방형 개폐식 돔 지붕을 대상으로 외장재 설계용 피크풍압계수를 제안하였다. Cheon et al.(2024)는 기존의 연구들이 주로 형상에 초점을 둔 것에 기인해 원형 평면의 중심 개방형 개폐식 돔 지붕을 대상으로 다양한 난류강도에 따라 달라지는 풍압의 특성을 분석하였고 이를 반영한 수정된 외장재 설계용 피크순압력계수를 제안하였다. 그러나 이와 같은 개폐식 돔 지

* 정희원, 서울과학기술대학교 스마트건축기술연구소 선임연구원, 공학박사

Smart Building Technology Research Institute,
Seoul National University of Science and Technology

** 교신저자, 정희원, 동경공예대학교 공학과 건축코스 교수, 환경학박사

Dept. of Engineering, Architecture Course, Tokyo Polytechnic University

Tel: 02-970-6587 Fax: 02-979-6563

E-mail: kimyc@arch.t-kougei.ac.jp

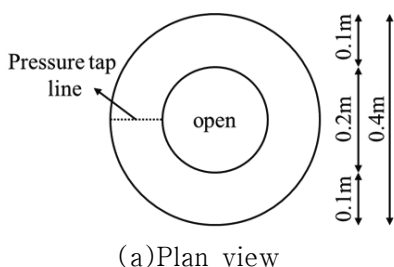
붕과 관련된 선행연구는 지붕의 라이즈-스팬 비 (이하 H/D 라 칭함)가 0.1로 국한되어 다양한 형상에 대한 고려를 하지 못하였다. 밀폐형 돔 지붕을 대상으로 연구된 다양한 연구결과에 따르면 돔 지붕 주변의 유동패턴 및 풍압 분포를 변화시키는 주요 원인은 H/D 이다. 이에 따라 현행 풍하중 기준에 제시되어 있는 밀폐형 돔 지붕의 영역별 풍압계수도 H/D 에 따라 큰 차이를 보인다^{7,8)}. 이와 같은 경향으로 볼 때 개폐식 돔 지붕 또한 H/D 에 큰 영향을 받을 것으로 예상되며, 나아가 지붕에 형성되는 개구부로 인해 밀폐형 돔 지붕과 비교해 더욱 복잡하고 다양한 유동 패턴을 보일 것으로 판단된다.

이에 따라 해당 논문에서는 H/D 의 변화에 따른 개폐식 돔 지붕의 풍압 분포 특성을 분석하였으며, 실험 결과를 바탕으로 높이 스펠 (이하 H/D 라 칭함) 및 난류강도에 따른 외장재 설계용 피크순압력계수 모델을 수정·제안하였다.

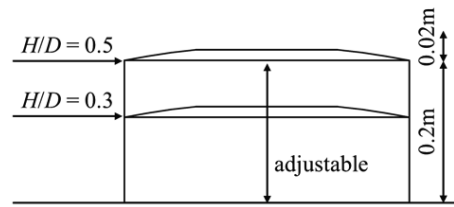
2. 풍동실험

2.1 실험 모형

〈Fig. 1〉은 해당 논문에서 사용된 실험모형의 평면 및 단면도이며, 중심에 개구부가 형성되는 중심 개방형 개폐식 돔 지붕을 재현하였다. 모형의 스케일은 1/150으로 모형의 직경(D)은 0.4m, 개구부의 직경은 0.2m로 개폐율은 50%이다. Lee et al.(2022)의 연구결과에 따르면, 실제 건설된 개폐식 돔 지붕의 H/D 범위는 0.00~0.18로 H/D 가 주로 낮게 구성된다. 따라서 지붕의 라이즈 (H)는 0.02로 구성하였고 이에 따라 H/D 는 0.05이다. 벽 높이(H)는 0.12m, 0.2m로 H/D 는 0.3과 0.5로 구성하였다.



(a) Plan view



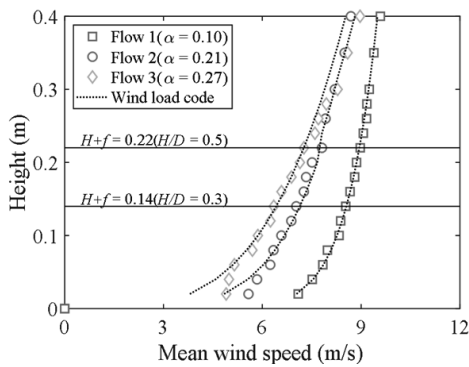
(b) Section view
〈Fig. 1〉 Test model

풍압 탭은 〈Fig. 1〉 (a)에 나타난 것과 같이 외측 및 내측면 지붕의 단일 라인에 10개를 설치하였다. 총 풍압 탭의 개수는 외·내측면 지붕을 합쳐 20개이다. 단일 라인에 풍압 탭이 설치되었으므로 실험풍향은 0도부터 180도까지 10도 간격으로 조절하였다. 원형 평면의 돔 지붕은 중심 라인으로 풍압이 대칭으로 나타나므로 180도까지 조절하였다.

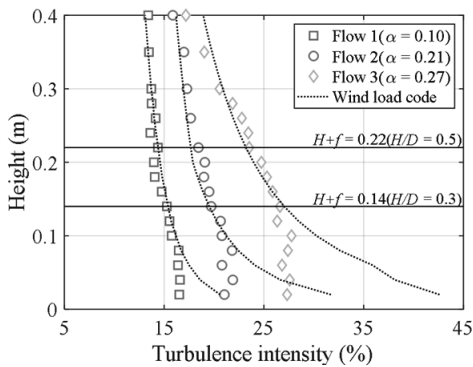
2.2 접근 유동 특성 및 데이터 취득

풍압실험은 동경공예대학교 풍공학센터의 대형 경계층 풍동 실험실에서 수행하였다. 〈Fig. 2〉는 해당 연구에서 사용한 평균 풍속 및 난류강도의 연직분포와 변동풍속의 파워스펙트럼을 나타낸 것이다. 다양한 접근 유동의 특성을 고려하기 위해 일본 풍하중 기준(AIJ-RLB(2015))를 참고하여 3가지 지표면조도를 모의하였다. 각 지표면 조도에 따른 고도분포지수는 α 는 0.10, 0.21 그리고 0.27이다. 참고로 일본과 국내 풍하중 기준은 밀폐형 돔 지붕에 대한 같은 외압계수를 제시하고 있고, 기준의 외압계수 값은 $\alpha=0.27$ 에 해당하는 Noguchi & Uematsu(2003)의 실험 결과를 반영한 값이므로 같은 조건을 고려하기 위해 일본 풍하중 기준을 참고하였다. α 가 증가함에 따라 평균풍속은 감소하고 난류강도는 증가한다. 풍동에서 속도스케일은 1/3으로 모형 최고 높이 ($H/f=0.22$)에서 평균풍속은 8.9m/s, 7.8m/s 및 7.2m/s이고, 난류강도는 14.4%, 18.4% 그리고 23.53%이다. 〈Fig. 2〉 (a) 및 (b)의 평균풍속 및 난류강도의 연직분포에서 함께 나타난 점선은 기준의 값으로 모형의 지붕 높이에서 평균풍속과 난류강도가 잘 부합하는 것을 확인할 수 있다.

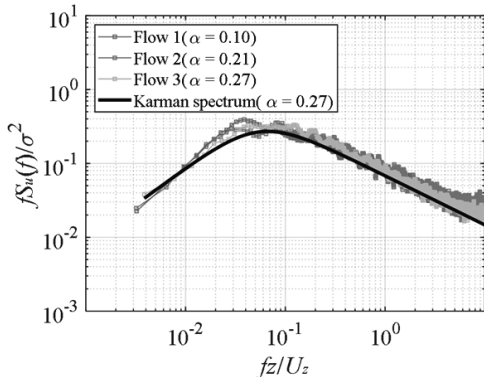
〈Fig.2〉 (c)는 모형 최고 높이 ($H+f=0.22m$)에서 변동풍속의 파워스펙트럼을 나타낸 것으로 3가지 기류 모두 카르만형 파워스펙트럼과 잘 일치하였다. 난류스케일은 0.45m 이상으로 모든 조건에서 모형의 치수보다 크게 구성되었으며, 레이놀즈 수는 풍압의 분포 안정적으로 나타나는 범위에서 실험하였다. 난류경계층에서 돔 지붕의 풍압이 안정적인 레이놀즈 수 범위는 1.0×10^5 이상으로 해당 실험에서 고려된 레이놀즈 수는 2.3×10^5 이상이다.



(a) Mean wind speed



(b) Turbulence intensity



(c) Power spectra of fluctuating wind speed
〈Fig. 2〉 Characteristics of approaching flow

풍압 측정은 샘플링 주파수 1,000Hz로 실제 시간 10분에 해당하는 10개의 시간이력 데이터를 취득하였다. 시간스케일은 1/50으로 실제 시간 10분은 풍동에서 12초이다. 모형의 풍동 내 폐쇄율은 3% 미만으로 단면폐쇄영향에 대한 데이터 보정을 실시하지 않았다. 실험 조건에 대한 전체적인 요약은 〈Table 1〉과 같다.

〈Table 1〉 Experiment condition

Condition	Flow1	Flow2	Flow3
Power law-index(α)	0.10	0.21	0.27
Velocity scale(1/3)	$H+f = 0.22m$		
	8.9m/s	7.8m/s	7.2m/s
Length scale(1/150)	0.4m		
Time scale(1/50)	12sec.		
	0.05		
H/D	0.3, 0.5		
Wind direction	0 to 180 degree		
10min. sample number	10		
Sampling frequency	1,000Hz		

해당 논문에서 외·내측 지붕에 대한 풍압계수의 시계열 데이터는 다음 식 (1)을 통해 계산하였다.

$$C_p(t) = \frac{P(t) - P_{ref}}{q_{H+f}} \quad (1)$$

여기서, $P(t)$ 는 외·내측 지붕에 설치된 풍압 탭에서 측정된 풍압, P_{ref} 는 풍동 바닥으로부터 1.2m에 위치한 피토관에서 측정된 정압력, q_{H+f} 는 모형의 지붕 높이에서의 설계속도압을 의미한다. 순압력계수의 시계열 데이터는 외·내측면 지붕에서 측정된 풍압의 차로 식 (2)를 통해 계산하였다.

$$C_{pn}(t) = \hat{C}_p(t) - \tilde{C}_p(t) \quad (2)$$

여기서, $\hat{C}_p(t)$ 는 외측 지붕의 풍압계수, $\tilde{C}_p(t)$ 는 내측면 지붕의 풍압계수, $C_{pn}(t)$ 는 순압력계수의 시계열을 의미한다. 이동평균시간은 풍하중 기준과 같은 1초를 사용하였다. 해당 논문에서 언급되는 외·내측과 순압력계수에 대한 평균, 변동 및 피크값은 10개의 앙상블에 대한 평균값이다. 부의 순압력은 상향풍압, 정의 순압력은 하향풍압을 의미하며, 해당 논문에서 분석 내용은 풍압의 변동이 가장 낮은 $\alpha=0.10$ 의

$H/D=0.5$ 에 대한 값을 대표적으로 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 f/D 에 따른 풍압 특성

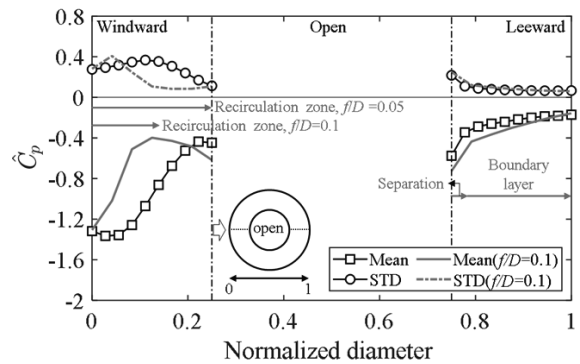
〈Fig. 3〉과 〈Fig. 4〉는 Flow 1의 $H/D=0.5$ 에 대한 외측과 내측 지붕에 대한 풍압계수를 나타낸 것이다. 돔 지붕의 중심선에 대한 풍압계수를 대표적으로 나타내었으며, f/D 에 따른 풍압의 변화를 비교할 수 있도록 Cheon et al. (2024)의 $f/D=0.1$ 에 대한 실험값을 그래프에 함께 표현하였다. x축은 풍압 탭의 거리와 돔 지붕의 직경으로 계산된 무차원직경으로 0은 풍상측 지붕 단부, 1은 풍하측 지붕 단부를 의미한다.

〈Fig. 3〉의 (a)는 외측 지붕에 대한 평균과 변동풍압계수를 나타낸 것이다. 풍상측 영역인 무차원 직경 0부터 0.22까지 $f/D=0.1$ 의 평균풍압계수값과 비교하여 $f/D=0.05$ 절댓값이 증가하는 것을 확인할 수 있다. 이러한 현상은 돔 지붕의 라이즈가 감소함에 따라 재순환 영역(recirculation zone)이 상대적으로 길어짐과 동시에 강한 와류가 형성되어 부압이 증가되기 때문이다. $f/D=0.1$ 은 무차원 직경 0.1부터 평균풍압계수의 절댓값이 점진적으로 다시 증가하는데, 이는 해당 영역에서 박리된 유동이 재부착되고 이후 영역부터 돔 표면의 형성되는 경계층의 영향을 받기 때문이다. 반면, $f/D=0.05$ 의 경우 무차원 직경 0.22까지 절댓값이 점진적으로 감소하면서 재부착 영역이 뚜렷하게 나타나지 않는다. 이는 풍상측의 모든 영역이 재순환 영역 안에 있기 때문이다. 한편, 무차원 직경 0.25인 개구부의 지붕 단부에서 $f/D=0.05$ 의 절댓값이 약 0.44로 일정해지는 것을 확인할 수 있는데, 이는 재부착의 영향이 아닌 단일 개구부가 있는 구조물에서 개구부 주변 외측 및 내측 평균풍압이 유사해지는 현상에 기인한 것으로 판단된다⁶⁾.

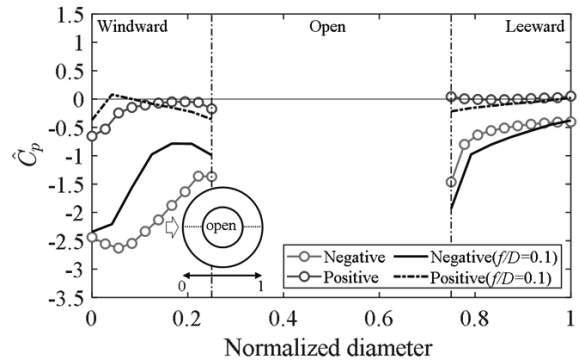
풍하측 영역인 무차원 직경 0.75부터 1까지 평균풍압계수의 변화 경향이 두 f/D 모두 유사하게 나타났다. 무차원 직경 0.75에서 유동의 박리가 발생하면서 절댓값이 급격히 증가하며, 무차원

직경 0.77에서 박리된 유동이 재부착되어 돔 표면에 형성되는 경계층의 영향을 받으면서 절댓값이 점진적으로 감소한다. 다만, $f/D=0.05$ 의 절댓값이 상대적으로 낮게 나타나는데, 이는 풍상측과는 반대로 지붕의 라이즈가 감소함에 따라 박리의 영향을 받는 공간이 감소하기 때문이다. 위에서 설명한 것과 같은 현상은 변동풍압계수에서도 확인할 수 있으며, 박리의 영향을 받는 영역에서 변동풍압계수는 0.2 이상으로 풍압의 변동이 증가하는 것을 확인할 수 있다.

〈Fig. 3〉의 (b)는 외측 지붕에 대한 부 및 정 피크풍압계수를 나타낸 것이다. 두 f/D 모두 부압이 지배적인 것을 확인할 수 있으며, 앞서 설명한 것처럼 풍상측 영역은 재순환 영역의 증가로 인한 강한 와류에 기인해 $f/D=0.05$ 의 부압이 더 큰 것을 확인할 수 있으며, 풍하측 영역은 박리의 영향을 받는 공간이 감소함에 따라 부압이 다소 작게 나타나는 것을 확인할 수 있다.



(a) Mean and STD



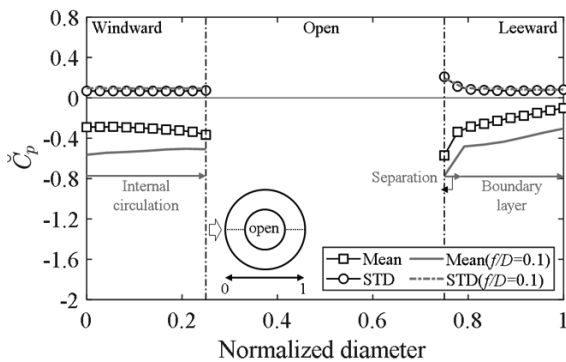
(b) Negative and positive peak

〈Fig. 3〉 External pressure coefficients for Flow 1 ($H/D=0.5$)

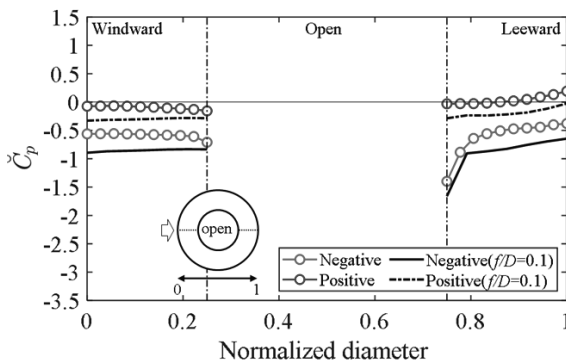
〈Fig. 4〉의 (a)는 내측 지붕에 대한 평균과 변동풍압계수를 나타낸 것이다. 풍상측 영역은

개구부를 통해 내부로 유입된 유동의 내부순환의 영향을 받아 전체적으로 부압의 지배적이며, 평균풍압계수의 절댓값도 모두 유사하게 나타난다. 한편, 두 f/D 를 비교하여 $f/D=0.05$ 의 절댓값이 더 작게 나타나는데, 이는 돔 지붕의 라이즈가 감소함에 따른 내부 부피의 감소와 관계가 있는 것으로 판단된다^{2,6)}. 풍하측 영역인 무차원 직경 0.75부터 1까지의 평균풍압계수의 변화와 절댓값은 박리의 영향으로 외측 지붕과 매우 유사하게 나타났다.

〈Fig. 4〉의 (b)는 내측 지붕에 대한 부 및 정의 피크풍압계수를 나타낸 것으로 외측 지붕과 같이 두 f/D 모두 부압이 지배적인 것을 확인할 수 있으며, 풍하측 영역의 경우 박리의 영향을 받는 공간이 감소함에 따라 부압이 다소 작게 나타나는 것을 확인할 수 있다.



(a) Mean and STD

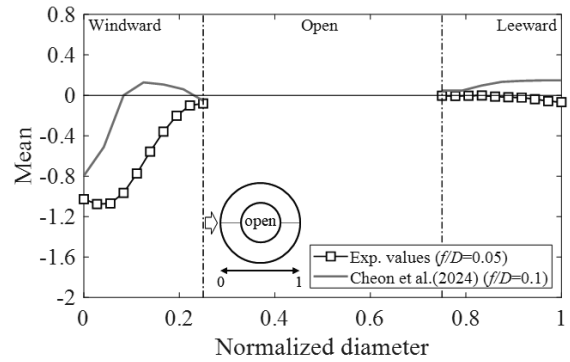


(b) Negative and positive peak

〈Fig. 4〉 Internal pressure coefficients for Flow 1 ($H/D=0.5$)

〈Fig. 5〉는 $f/D=0.05$ 의 평균 및 피크순압력계수를 나타낸 것이며, 비교를 위해 $f/D=0.1$ 의 값을 그래프에 함께 표현하였다. 〈Fig. 5〉의 (a)는 평균순압력계수로 풍상측 영역은 일정한 내측

지붕의 풍압으로 인해 〈Fig. 3〉의 (a)에 나타난 외측 지붕의 평균풍압계수와 비교해 절댓값의 변화 경향은 같고 값의 크기만 감소하는 것을 확인할 수 있다. 또한, $f/D=0.1$ 과 비교하여 전체적으로 부압의 영향만 받는데, 이는 앞서 설명한 것처럼 외측 지붕의 재순환 영역 증가로 발생하는 강한 와류 때문이다. 풍하측 영역은 절댓값이 모두 0에 가깝게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 이는 외측과 내측 지붕에서 발생하는 부압의 크기가 유사하기 때문이다. 반면, $f/D=0.1$ 의 값은 무차원 직경 약 0.8부터 정압의 영향이 증가하는데, 이는 내측면 지붕에서 발생하는 부압이 외측 지붕보다 상대적으로 크기 때문이다.

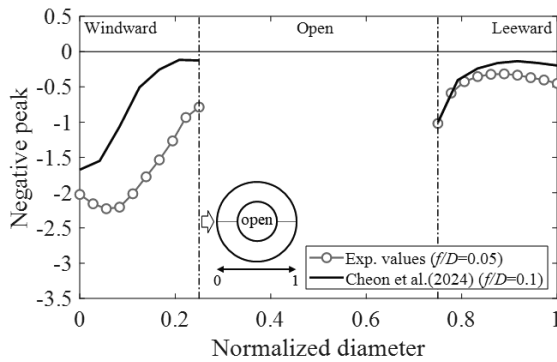


(a) Mean

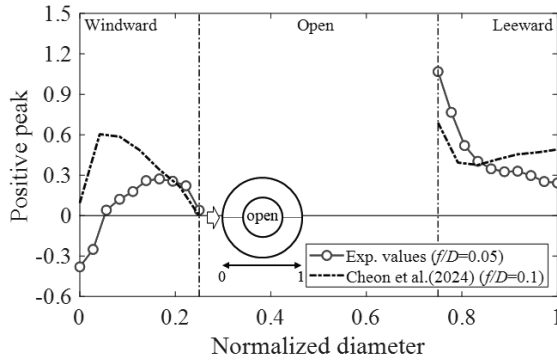
〈Fig. 5〉 Mean net pressure coefficients for Flow 1 ($H/D=0.5$)

〈Fig. 6〉의 (a)는 부의 피크순압력계수를 나타낸 것이다. 전체적으로 〈Fig. 3〉의 (b)에 나타난 외측 지붕에 대한 부의 피크풍압계수와 비교하여 변화 경향은 유지되지만, 절댓값은 감소하는 것을 확인할 수 있다. 〈Fig. 6〉의 (b)는 정의 피크순압력계수를 나타낸 것으로 내측 지붕에서 발생하는 부압으로 인해 풍상측 지붕 단부 영역을 제외한 나머지 영역에서 정압의 영향이 발생하는 것을 확인할 수 있다. 그러나 풍상측 영역의 경우 $f/D=0.1$ 과 비교해 정압의 영향이 작게 나타나는 것을 확인할 수 있는데, 이는 외측 지붕에서 간헐적으로 접근 유동의 직접적인 영향을 받는 $f/D=0.1$ 과 달리 $f/D=0.05$ 는 박리의 영향만을 받기 때문이다. 한편, 무차원 직경 0.75인 풍하측 지붕 단부에서 정의 피크순압력계수는 $f/D=0.05$

의 값이 더 크게 나타났다. 이와 같은 경향은 해당 영역에서 내측 지붕의 부압이 더 큰 $f/D=0.1$ 과와 달리 $f/D=0.05$ 은 외·지붕에서 발생하는 부압이 유사하기 때문이다.



(b) Negative peak



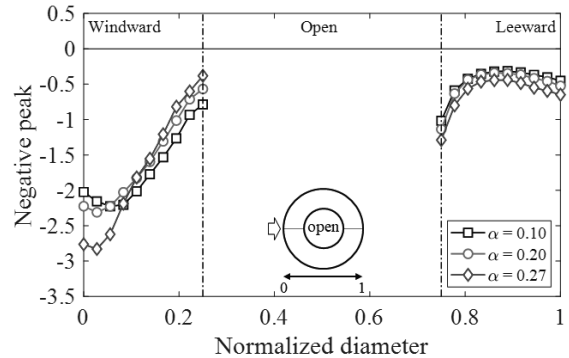
(c) Positive peak

〈Fig. 6〉 Peak net pressure coefficients for Flow 1 ($H/D=0.5$)

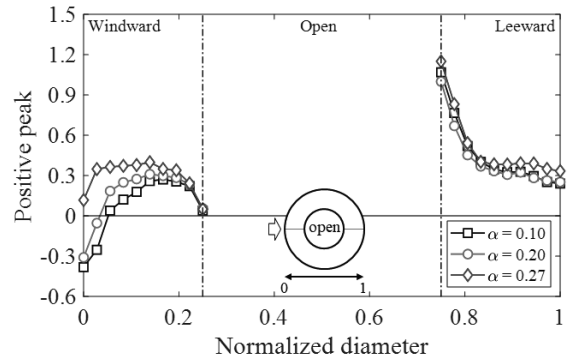
3.2 고도분포지수에 따른 피크순압력 특성

〈Fig. 7〉은 고도분포지수에 따른 피크순압력 계수를 나타낸 것이다. 전체적으로 고도분포지수가 증가함에 따라 절댓값이 증가하는 경향을 확인할 수 있다. 접근 유동의 난류강도가 증가할수록 박리가 잘 일어나는 조건이 되고 압력의 변동성이 커지게 되어 박리된 유동이 지붕 표면에 미치는 압력의 변화가 증가한다. 이와 같은 경향은 돔 지붕을 대상으로 다양한 선행연구에서 밝혀진 일반적인 사실이다⁴⁻⁸⁾. 해당 실험 결과는 Cheon et al. (2024)의 $f/D=0.1$ 에 대한 개방형 돔 지붕과 같은 경향을 보였다. 한편, 〈Fig. 7〉의 (a)인 부의 피크순압력계수에서 무차원 직경 약 0.1 부근에서부터 고도분포지수가 증가함에 따라 절댓값이 다소 작게 나타나는데, 이는 난류강도가 증

가함에 따라 박리로 형성되는 와류의 중심축이 지붕 단부에 가까워지게 되고, 와류의 영향을 받는 범위가 감소해 나타나는 현상으로 판단된다.



(a) Negative peak



(b) Positive peak

〈Fig. 7〉 Peak net pressure coefficients according to flow condition

4. 외장재 설계용 피크순압력계수

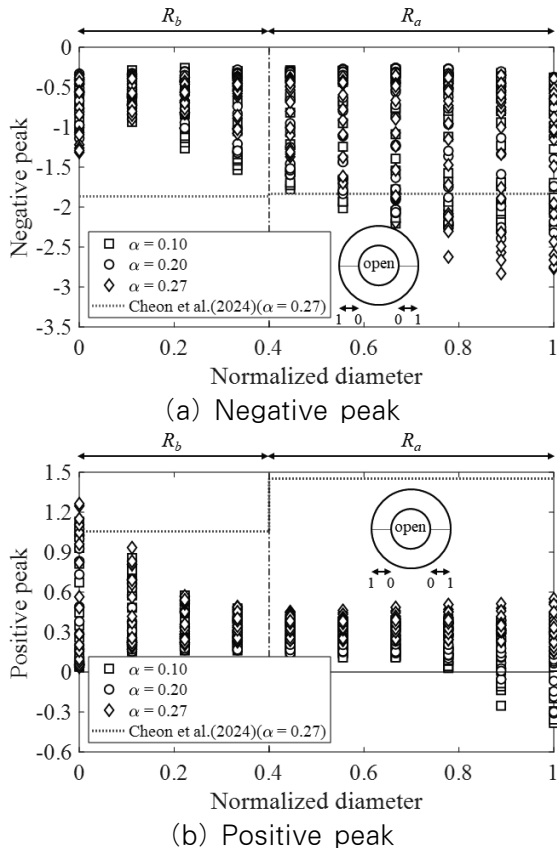
Cheon et al.(2024)는 $f/D=0.1$ 의 개방형 돔 지붕을 대상으로 난류강도와 높이 변수에 따른 외장재 설계용 피크순압력계수 모델을 두 영역으로 나누어 다음과 같은 2차 다항식으로 제안하였다.

$$C_{pn,peak} = aI_H^2 + bI_H + c \quad (4)$$

여기서, $C_{pn,peak}$ 는 영역별 정 및 부의 피크순압력 계수, I_H 는 지붕 최고높이에서의 난류강도 그리고 a , b 및 c 는 모델의 파라미터이다. 두 영역은 개방형 돔 지붕의 반경을 기준으로 풍상측 단부로부터 60%까지를 R_a 영역 그리고 나머지 40%를 R_b 로 구분된다.

〈Fig. 8〉은 실험값과 Cheon et al.(2024)이 제안한 영역별 피크순압력계수를 비교한 것이다. Cheon et al.(2024)의 제안값은 도트라인으로 표

시하였다. 그래프에 나타난 실험값은 모든 고도 분포지수에 대한 $H/D=0.5$ 의 값이며, Cheon et al.(2024)의 제안값은 $H/D=0.5$ 의 고도분포지수 0.27에 대한 값이다. 낮은 라이즈에 기인해 지붕 주변의 유동 패턴이 달라짐에 따라 R_a 영역의 부의 피크순압력계수와 R_b 영역의 정의 피크순압력계수의 실험값이 제안값보다 크며, 반대로 R_a 영역의 정의 순압력계수와 R_b 영역의 부의 피크순압력계수는 실험값이 제안값보다 작게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 따라서 H/D 가 0.05인 개방형 돔 지붕에 적용할 수 있는 피크순압력계수를 유추하기 위해선 기존 모델의 파라미터가 수정되어야 한다.



〈Fig. 8〉 Comparison of the values proposed in previous studies with the experimental values obtained

〈Table 2〉와 〈Table 3〉은 $H/D=0.05$ 의 실험값을 대상으로 수정된 파라미터 값이며, 두 영역에 대해 각 조건(H/D 및 난류강도)에 따른 영역별 가장 큰 절댓값을 도출한 뒤, 식(4)를 기반으로 파라미터값을 도출하였다.

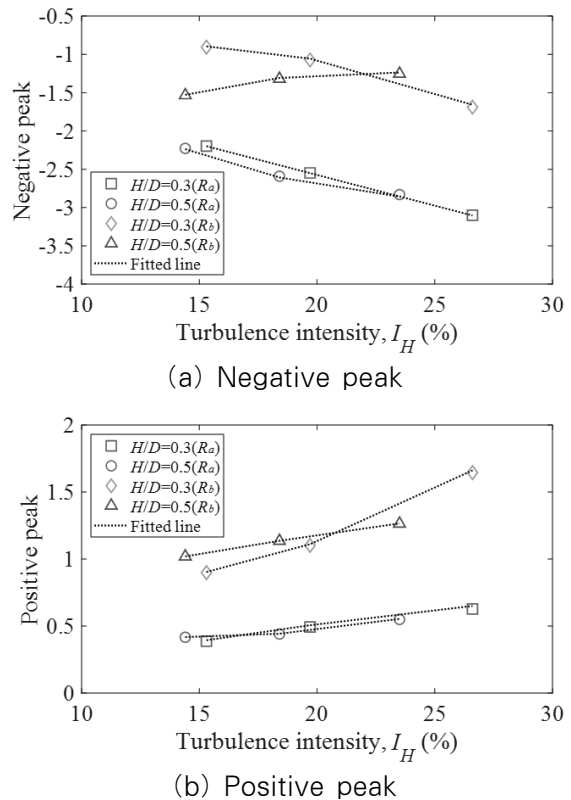
〈Table 2〉 Parameter for negative peak net pressure coefficients

Zone	$H/D=0.3$			$H/D=0.5$		
	a	b	c	a	b	c
R_a	-2E-05	-0.0793	-0.9798	0.0048	-0.25	0.368
R_b	-0.0045	0.1211	-1.6944	-0.0045	0.2026	-3.5118

〈Table 3〉 Parameter for Positive peak net pressure coefficients

Zone	$H/D=0.3$			$H/D=0.5$		
	a	b	c	a	b	c
R_a	-0.0004	0.0394	-0.1141	0.0017	-0.0495	0.7788
R_b	0.0029	-0.0544	1.0585	-0.0004	0.0422	0.4958

〈Fig. 9〉는 두 영역에서 나타난 최대 피크순압력계수와 난류강도의 관계 및 수정된 파라미터를 적용한 모델로 예측한 값(Fitted line)을 나타낸 것이다. 그래프에서 확인할 수 있듯이 실험값과 예측값의 적합도가 높은 것을 알 수 있다.



〈Fig. 9〉 Relationship of peak net pressure coefficient with turbulence intensity

위와 같은 결과로 해당 논문에서 수정·제안된 피크순압력계수 모델은 낮은 f/D 를 갖는 개방형 돔 지붕의 기초설계단계에서 합리적인 외장재용 풍하중을 산정할 수 있을 것으로 판단된다.

5. 결론

해당 연구에서는 개폐식 돔 지붕을 대상으로 라이즈-스팬 비 및 다양한 접근 유동 변수를 적용한 풍동실험을 통해 풍압 분포의 특성을 분석하였다. 이 연구의 주요 결론을 요약하면 다음과 같다.

1) f/D 의 변화에 따른 풍압 분포의 분석 결과, 외측 지붕의 풍상측 영역은 f/D 가 감소함에 따라 재순환영역이 길어지고, 이로 따라 강한 와류가 형성되면서 부압의 상대적으로 증가하는 것을 확인하였다. 이는 풍상측 영역에서 발생하는 부의 순압력의 영향 증가시키는 원인임을 알 수 있었다.

2) 풍하측 영역의 경우 두 f/D 모두에서 풍압의 변화 경향은 유사했지만, 외측과 내측 지붕의 풍압의 크기는 $f/D=0.1$ 에 비해 매우 유사하게 나타나는 것을 확인하였다. 이에 따라 풍하측 개구부 지붕 단부에서 피크순압력계수의 절댓값이 유사하게 나타나는 것을 알 수 있었다.

3) 고도분포지수에 따른 풍압의 특성을 분석한 결과, 난류강도가 증가함에 따라 외·내측 지붕의 피크풍압계수 및 피크순압력계수가 함께 증가하는 것을 확인하였다.

4) 실험값과 선행연구에서 제안된 값을 비교한 결과, f/D 가 감소함에 따라 달라지는 지붕 주변의 유동패턴으로 인해 기존 제안된 피크순압력계수 모델은 과대 혹은 과소평가 될 수 있음을 확인하였다. 이에 따라 피크순압력계수 모델의 파라미터 값을 수정·제안하였다.

해당 연구에서 고려된 형상 변수 및 접근 유동 변수는 다소 제한적이므로 향후 연구에서 추가적인 변수를 적용해 넓은 범위의 풍압 데이터를 축적하여 보다 합리적인 풍하중 산정 방법을 연구할 필요가 있다.

감사의 글

이 논문은 2023년도 동경공예대학교 풍공학센터 공동연구(2023 Fiscal Year Wind Engineering Research Center Joint Usage/Research Center) (과제번호 23233001)의 연구비 지원에 의한 결과의 일부임.

References

- Chen, B., Wu, T., Yang, Y., Yang, Q., Li, Q., & Kareem, A., "Wind effects on a cable-suspended roof: Full-scale measurements and wind tunnel based predictions" *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol.155, pp.159-173, 2016, DOI:<https://doi.org/10.1016/j.jweia.2016.06.006>
- Liu, M., Li, Q. S., Huang, S. H., Shi, F., & Chen, F., "Evaluation of wind effects on a large span retractable roof stadium by wind tunnel experiment and numerical simulation", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol.179, pp.39-57, 2018, DOI:<https://doi.org/10.1016/j.jweia.2018.05.014>
- Kim, Y. C., Yoon, S. W., Cheon, D. J., & Song, J. Y., "Characteristics of wind pressures on retractable dome roofs and external peak pressure coefficients for cladding design", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol.188, pp.294-307, 2019, DOI:<https://doi.org/10.1016/j.jweia.2019.02.016>
- Lee, J. H., Kim, Y. C., Cheon, D. J., & Yoon, S. W., "Wind pressure characteristics of elliptical retractable dome roofs", *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*, Vol.21, No.4, pp.1561-1577, 2022, DOI:<https://doi.org/10.1080/13467581.2021.1941996>
- Lee, J. H., Cheon, D. J., Kim, Y. C., & Yoon, S. W., "Peak Net Pressure Coefficients of Elliptical Center-Open Dome Roofs", *Materials*,

Vol.15, No.16, 5497, 2022,

DOI:<https://doi.org/10.3390/ma15165497>

6. Cheon, D. J., Kim, Y. C., & Yoon, S. W., "Proposing Peak Net Pressure Coefficients for Cladding on Open Large-Span Roof Structures Considering Various Boundary Layer Flows", Journal of the Architectural Institute of Korea, Vol.40, No.2, pp. 221~231, 2024, DOI:<https://doi.org/10.5659/JAIK.2024.40.2.221>
7. Uematsu, Y., Yamada, M., Inoue, A., & Hongo, T., "Wind loads and wind-induced dynamic behaviour of a single-layer latticed dome", Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol.66, No.3, pp.227~248, 1997, DOI:<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0167610597001335?via%3DIJhub>
8. Noguchi, M., & Uematsu, Y., "Model of fluctuating wind pressures on spherical domes for load estimation of cladding", Proceedings of the 18th National Symposium on Wind Engineering, Japan, pp.353~358, 2004, DOI:<https://doi.org/10.14887/kazekosymp.18.0.000030.0>
9. Architectural Institute of Japan, AIJ Recommendations for Loads on Buildings, 2015.
10. Noguchi, M., & Uematsu, Y., "Design wind pressure coefficients for spherical domes", In Proceedings of the Annual Meeting, pp. 177-178, 2003, DOI:<https://doi.org/10.14887/jaweam.2003.0.88.0>

- Received : May 31, 2024
- Revised : June 04, 2024
- Accepted : June 04, 2024