

국가별 풍하중 기준과 풍동실험에 따른 대공간 구조물 지붕의 풍압계수 분석

Analysis of Wind Pressure Coefficient for Spatial Structure Roofs by Wind Load Standards and Wind Tunnel Tests

천 동 진*
Cheon, Dong-jin

윤 성 원**
Yoon, Sung-Won

Abstract

Spatial Structure has suffered from a lot of damage due to the use of lightweight roofs. Among them, the damage caused by strong winds was the greatest, and the failure of the calculation of the wind load was the most frequent cause. It provides that wind tunnel test is used to calculate the wind load. However, it is often the case that the wind load is calculated based on the standard of wind load in the development design stage. Therefore based on this, the structure type and structural system and member design are often determined. Spatial structure is usually open at a certain area. The retractable roof structure should be operated with the open roof in some cases, so the wind load for the open shape should be considered, but it is not clear on the basis of the wind load standard. In this paper, the design wind pressure of a closed and retractable roof structure is calculated by KBC2016, AIJ2004, ASCE7-10, EN2005, and the applicability of wind pressure coefficient is compared with wind tunnel test.

Keywords : Retractable roof, Spatial structure, Wind pressure coefficient, Design wind pressure, Wind tunnel tests

1. 서론

최근 국민소득이 증가되면서 레저 및 스포츠 등에 대한 관심이 높아지고 있다. 이에 따라 대공간 구조물에 대한 수요가 증가하고 있으며, 그 중에서 특히 개폐식 대공간 구조물에 대한 관심과 수요가 증가하고 있다¹⁾²⁾.

이러한 대공간 구조물은 경량화된 지붕 구조 및 재료를 사용하는 특징을 가지고 있으며, 대부분 경량의 막재료에 의한 피해가 많이 발생된다. 국내의 경우 제주월드컵경기장, 인천문학경기장 그리고 부산아시아드경기장 등 지붕의 파손 및 붕괴가 발생하였

으며 국외의 경우 Georgia Dome, Metro Dome, Motreal Olympic Stadium 등을 포함하여 다수의 경기장이 지붕이 찢기거나 붕괴되는 사례가 발생하였다. 그 원인으로는 크게 강풍과 적설하중이 주로 작용을 하였으며, 그 중에서도 강풍에 의한 피해사례가 더 높은 비중을 차지하는 것으로 나타났다. 강풍에 의한 원인 중 풍하중 산정의 실패가 가장 많은 원인으로 작용하였다³⁾⁴⁾.

대공간 구조물의 경우 장경간의 지붕구조로 구성되기 때문에 상대적으로 풍하중이 구조 안정성에 차지하는 비중이 매우 크다. 이러한 장경간 지붕구조에 대해서는 일반적으로 실시설계 단계에서 풍동 실험이 시행되고 있지만 기본설계 단계에서는 설계 기준 등에 의해 풍하중을 결정하고 이에 근거하여 구조형식 및 부재를 결정하는 경우가 많다⁵⁾.

대공간 구조물의 경우 대부분 일정 면적이 열린 지붕형태를 지니고 있으며, 개폐식 대공간 지붕의 경우 상황에 따라 개폐하여 운영되기 때문에 일정 면적이 열린 형태에 따른 풍하중이 고려되어야 한

* 학생회원, 서울과학기술대학교 건축과, 석사과정
Dept. of Architecture, Seoul National University of Science and Technology

** 교신저자, 정회원, 서울과학기술대학교 건축학부 교수, 공학박사
School of Architecture, Seoul National University of Science and Technology
Tel: 02-970-6587 Fax : 02-979-6563
E-mail: swyoon@seoultech.ac.kr

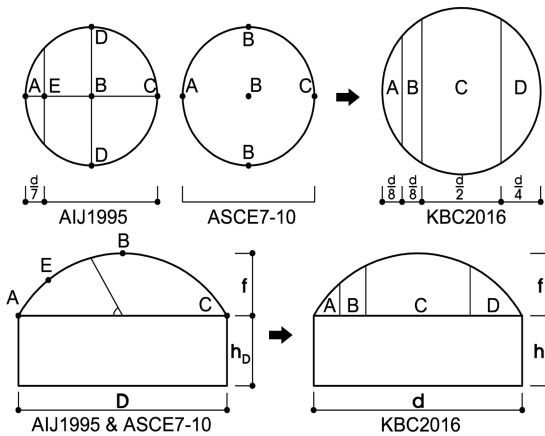
다. 그러나 이에 대한 풍압계수는 현행 설계기준에 명확히 제시하고 있지 않다^{5),6)}.

따라서 이 논문은 풍동실험된 밀폐형 인천문학수영장과 개방형 제주월드컵경기장 2가지 경우에 대해 하중기준에 따라 설계풍압을 산정하여 풍동실험 결과와 비교하였다. 이를 통해 밀폐형과 개방형 대공간 구조물에 대한 풍압계수의 적용성을 검토하였다.

2. 주 골조용 외압계수

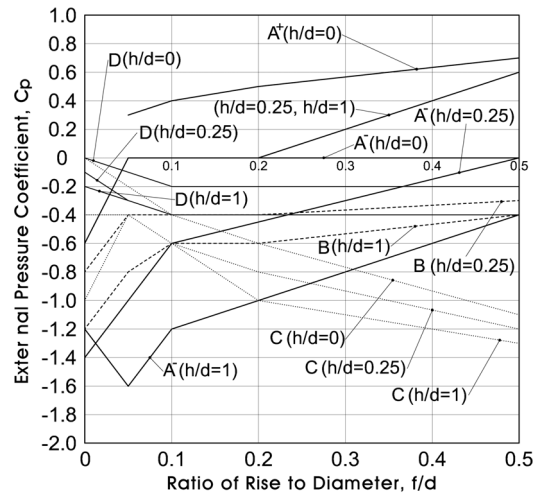
주 골조용 설계풍압 계산을 위해 제시된 돔 지붕의 외압계수의 경우 각국 기준의 제시 방법이 서로 상이하다. 유럽과 미국은 같은 풍하중기준을 사용하고 있고 일본과 한국이 같은 조건을 사용하고 있다⁷⁻¹⁰⁾. 따라서 ASCE7-10과 KBC2016 기준 중 비교적 자세히 외압계수를 제시하고 있는 KBC2016을 기준으로 하여 주 골조용 외압계수를 정리하였다.

돔 지붕면의 영역별 지점(A, B, C, D)의 경우 각 기준마다 그 거리와 표기방법이 다르므로 KBC2016의 기준에 맞추어 <Fig. 1>과 같이 정리하였다⁷⁻¹⁰⁾.

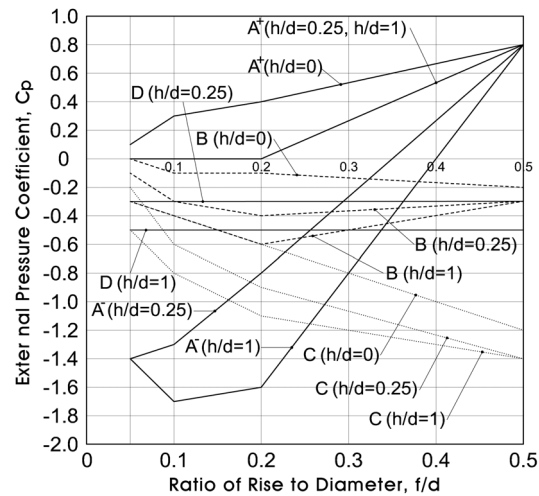


<Fig. 1> External pressure points

국가별 하중기준에 제시된 돔 지붕면의 영역별 점(A, B, C, D)과 h/d, f/d 비율에 따른 풍압계수의 차이 값들은 선형보간을 이용하여 값을 산출하도록 명시하고 있다^{4,6)}. 따라서 KBC2016에서 기준에 맞추어 지붕면의 영역별 지점의 f/d 비율(0, 0.05, 0.1, 0.2, 0.5)에 따라 h/d 비율(0, 0.25, 1)의 값을 선형보간하여 정리하였으며, 이를 나타낸 그래프는 <Fig. 2>와 같다.



(a) KBC2016



(b) ASCE7-10

<Fig. 2> External pressure coefficient of wind load standard

3. 주 골조용 설계풍압

주 골조용 설계풍압의 산출식은 내압의 부분에서 KBC2016과 ASCE7-10의 계산방법이 서로 상이하기 때문에 두 하중기준의 계산식 (1), (2)^{7),9)}를 사용하여 값을 산출하였다.

$$P_r = q_H (G_{pe} C_{pe} - G_{pi} C_{pi}) \quad (1)$$

$$p = q G C_p - q_i (G C_{pi}) \quad (2)$$

(1): KBC 2016, (2): ASCE7-10

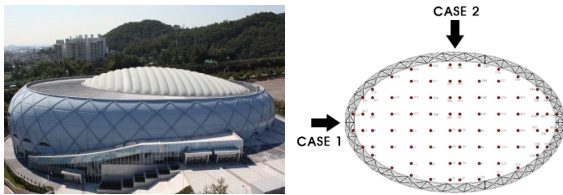
- $P_r = p$: 설계풍압
- $q_H = q = q_i$: 설계속도압
- $G_{pe} = G$: 외압가스트영향계수
- $C_{pe} = C_p$: 외압계수
- G_{pi} : 내압가스트영향계수
- $C_{pi} = G C_{pi}$: 내압계수

위 식의 계산에 필요한 지표면조도, 설계 속도압, 외압가스트영향계수 등은 풍동실험과 같은 값을 적용하였으며, 단위는 풍동실험 보고서를 기준으로 인천문학경기장은 N/m^2 , 제주월드컵경기장은 kgf/m^2 의 단위를 사용한다^{13),14)}.

3.1 인천문학경기장

3.1.1 계산조건

하중기준은 원형 지붕형태에 대한 풍압계수를 제시하는 반면, 인천문학수영장은 타원형의 건물로 2가지 풍향을 고려해 Case 1, 2(풍향각 290°, 20°)로 계산하였다. 계산조건은 <Fig. 3>과 <Table 1>에 나타냈다.



<Fig. 3> Direction of the wind

<Table 1> Calculation condition¹³⁾

Condition	Case 1	Case 2
Ground surface roughness	B	C
Design velocity pressure(q_H)	474.83	742.99
Gust effect factor(G_{pe})	1.344	1.344
h(m)	17.5	17.5
d(m)	78.3	59.2
f(m)	9.5	9.5

3.1.2 풍압계수

Case 1은 $h/d=0.224$, $f/d=0.121$ 그리고 Case 2는 $h/d=0.300$, $f/d=0.160$ 의 비율로 선형보간하여 외압계수를 산출하였고 그 값은 <Table 2>와 같다.

<Table 2> Interpolated pressure coefficient

Case	Point	C_{pe}	
		KBC2016	ASCE7-10
1	A	-0.43	-0.89
	B	-0.36	-0.30
	C	-0.62	-0.64
	D	-0.40	-0.27

Case	Point	C_{pe}	
		KBC2016	ASCE7-10
2	A	-0.31	-0.85
	B	-0.41	-0.37
	C	-0.73	-0.79
	D	-0.40	-0.31

밀폐형 구조물의 내압계수는 기준에서 <Table 3>과 같이 제시하고 있다^{7),9)}. 주 골조용은 하중기준에서 정압이 발생할 경우 내압계수를 고려하여 풍하중을 산출하며, 부압의 경우 내압을 고려하지 않는다^{7),9)}. 인천문학수영장의 경우 외압계수가 모두 부압으로 발생하고 있으므로 내압을 0으로 적용하였다.

<Table 3> Internal pressure coefficient⁴⁻⁶⁾

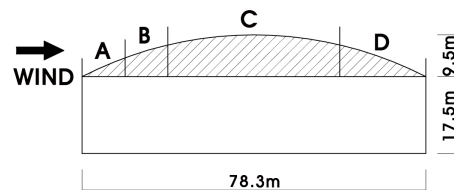
	KBC2016	ASCE7-10
C_{pi}	0 or -0.40	0.18 or -0.18

3.1.3 설계풍압

식 (1)과 식 (2)는 내압 부분을 제외하고 계산하는 방법이 같으므로 식 (3)^{7),9)}을 통해 설계풍압을 산출하였다.

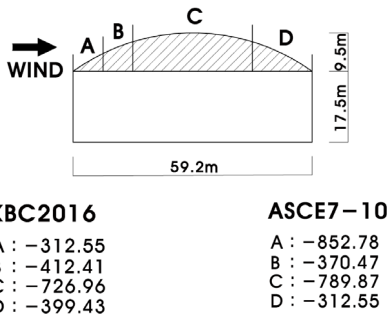
$$P_r = q_H (G_{pe} C_{pe}) \quad (3)$$

산출된 설계풍압 값은 지붕면의 영역별로 표시하였으며, KBC2016, ASCE7-10 순서로 정리하여 <Fig. 4>와 같이 나타냈다.



KBC2016	ASCE7-10
A : -271.23	A : -581.31
B : -229.10	B : -190.81
C : -396.94	C : -408.43
D : -255.27	D : -171.67

(a) Case 1



(b) Case 2

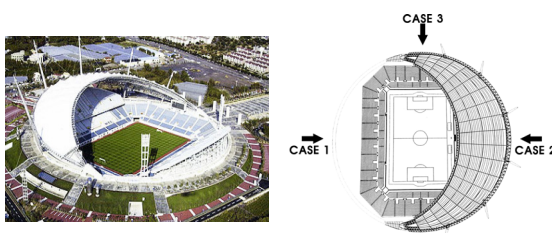
〈Fig. 4〉 Design wind pressure based on Eq (3)

두 Case 모두 B, C, D지점의 설계풍압은 비슷한 값을 보이고 있다. 반면 KBC2016의 외압계수를 적용하여 산출한 값은 ASCE7-10 기준에 비해 A지점에서 2.73배 낮은 값으로 차이를 보인다.

3.2 제주월드컵 경기장

3.2.1 계산조건

이 구조물은 개방된 형태의 구조물로 풍향에 따라 지붕의 영역별 지점이 달라지고 외압이 다르게 적용된다. 따라서 Case 1, 2, 3으로 세 방향(풍향각 0°, 180°, 90°)을 고려하여 모든 지점(A, B, C, D)의 풍압을 산출하였다. 산출을 위한 조건은 〈Fig. 5〉와 〈Table 4〉에 정리하여 나타냈다^{11),12),14)}.



〈Fig. 5〉 Direction of the wind

〈Table 4〉 Calculation condition¹⁴⁾

Condition	Case 1, 2, 3
Ground surface roughness	C
Design velocity pressure(q_H)	160.7
Gust effect factor(C_{pe})	1.454
h(m)	7.4
d(m)	235
f(m)	44

3.2.2 풍압계수

3가지 Case 모두 $h/d=0.17$, $f/d=0.19$ 의 동일한 비율로 선형보간하여 각 영역별 지점의 외압계수를 산출하였으며 〈Table 5〉와 같이 정리하였다.

〈Table 5〉 Interpolated pressure coefficient

Case	Point	C_{pe}	
		KBC2016	ASCE7-10
1	C	-0.53	-0.32
	D	-0.34	0.14
2	A	0.12	-0.35
	B	-0.35	-0.52
	C	-0.72	-0.78
3	A	0.12	-0.35
	B	-0.35	-0.52
	C	-0.72	-0.78
	D	-0.34	0.14

원형의 평면 및 같은 h/d , f/d 비율을 가진 제주월드컵경기장은 풍향에 따라 풍압의 영역별 지점이 달라지지만 각 영역별 지점의 외압계수는 변하지 않는다⁷⁾.

이 경기장은 KBC2016 기준에 따라 부분 개방형으로 가정하였고⁷⁾, 〈Table 6〉과 같이 KBC2016과 ASCE7-10의 내압계수를 적용하였다.

〈Table 6〉 Internal pressure coefficient

	KBC2016	ASCE7-10
G_{pi}	2	
C_{pi}	0.7 or -0.7	0.55 or -0.55

3.2.3 설계풍압

외압계수 산출 결과 KBC2016의 A지점(풍상면 1/8)과 ASCE7-10의 D지점(풍하면 1/4)이 정압으로 나타나는 반면, 나머지 지점에서 부압이 발생하는 것으로 나타난다. 기본적으로 부압이 발생할 경우 내압을 고려하지 않지만, 그 예는 밀폐형에 대한 내용이 다^{7),9)}. 제주월드컵경기장의 경우 부분적으로 정압이 발생되며 풍향에 따라 내압이 발생할 것으로 예상되기 때문에 내압을 고려한 설계풍압과 고려하지 않은 설계풍압 값을 산출하였다. 내압이 고려되지

않은 설계풍압의 값은 <Table 7>과 같다.

<Table 7> Design wind pressure ($C_{pi}=0$)

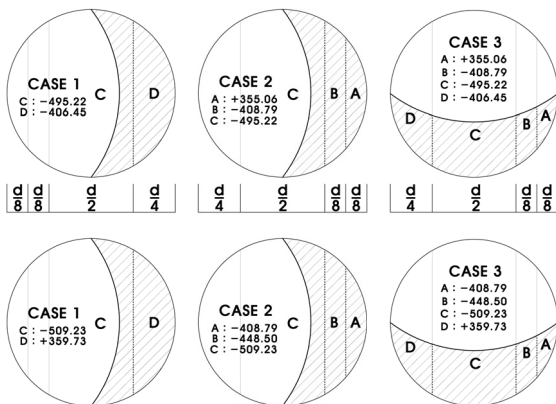
Point	P_r	
	KBC2016	ASCE7-10
A	28.03	-81.78
B	-81.78	-121.47
C	-168.19	-182.21
D	-79.42	32.70

내압을 고려한 계산은 식 (1)과 식 (2)를 사용하였다. 각 식에 적용된 내압계수 및 내압은 <Table 8>과 같다.

<Table 8> Internal pressure^{7),9)}

KBC2016	$G_{pi}C_{pi} = 2 \times \pm 0.7 = \pm 1.4$
ASCE7-10	$q_i(GC_{pi}) = 160.7(\pm 0.55) = \pm 88.385$

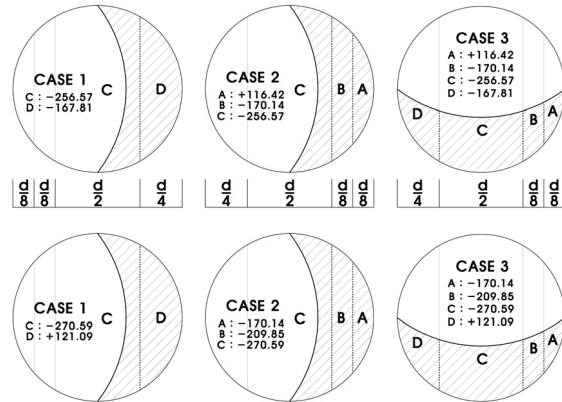
KBC2016 기준인 식 (1)을 통해 산출된 설계풍압은 <Fig. 6>과 같이 정리하였으며 KBC2016, ASCE7-10 순서로 나열하였다.



<Fig. 6> Design wind pressure based on Eq (1)

ASCE7-10 기준인 식 (2)를 통해 계산된 설계풍압은 <Fig. 7>과 같으며 순서는 동일하다.

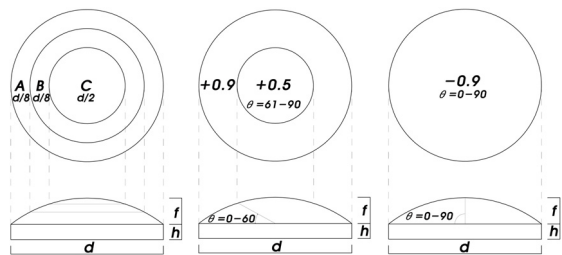
산출된 설계풍압은 KBC2016에서 A지점이 정압, ASCE7-10에서 D지점이 정압으로 차이를 보이며 식 (2)를 통해 산출된 값이 식 (1)을 통해 산출된 값보다 최대 2.45배 낮은 값을 보인다.



<Fig. 7> Design wind pressure based on Eq (2)

4. 외장재용 외압계수

외장재용 설계풍압을 산출하기 위해 사용되는 피크외압계수의 경우 <Fig. 8>과 같이 ASCE7-10은 주어진 각도에 따라 사용되며 KBC2016의 기준은 비교적 자세히 지붕의 영역별 지점과 h/d, f/d 비율에 따라 피크외압계수를 제시하고 있다^{7),9)}.



(a) KBC2016 (b) ASCE7-10 (c) ASCE7-10

<Fig. 8> External pressure points

5. 외장재용 설계풍압

외장재용 설계풍압은 KBC2016, ASCE7-10 2가지 기준을 사용해 값을 산출했으며, 사용된 식은 식 (4)와 식 (5)이며^{7),9)} 정압 및 부압에 대한 설계풍압 값을 산출하였다^{7),9)}. 인천문학수영장은 N/m^2 , 제주월드컵경기장은 kgf/m^2 의 단위를 사용하였다^{13),14)}.

$$P_c = q_H(GC_{pe} - GC_{pi}) \quad (4)$$

$$p = q_h \times GC_{pe} - q_h(GC_{pi}) \quad (5)$$

(4) : KBC 2016, (5) : ASCE7-10

$P_c = p$: 설계풍압
 $q_H = q_h$: 설계속도압
 GC_{pe} : 외압계수
 GC_{pi} : 내압계수

외장재의 경우 내압을 고려하여 설계풍압을 산출해야하므로 <Table 9>의 KBC2016과 ASCE7-10의 내압계수를 적용하였으며 KBC2016에서 부분개방형 중 적용된 내압계수는 ± 1.40 이다^{7),9)}.

<Table 9> Internal pressure coefficient^{7),9)}

Enclosure classification	GC_{pi}	
	KBC2016	ASCE7-10
Open buildings	0.00	0.00
Partially enclosed buildings	± 0.83	± 0.55
	± 1.40	
Enclosed building	0 or -0.52	± 0.18

5.1 인천문학경기장

5.1.1 계산조건

계산 조건은 주 골조용과 동일하게 Case 1, Case 2로 2가지 풍향(풍향각 $290^\circ, 20^\circ$)에 대해 고려하였으며 계산에 필요한 값은 풍동실험과 동일한 값을 적용하였다^{13),14)}.

5.1.2 풍압계수

인천문학경기장 Case 1은 $h/d=0.224, f/d=0.121$ Case 2는 $h/d=0.3, f/d=0.16$ 으로 선형보간하여 피크외압계수를 산출하여 <Table 10>과 같이 정리하였다.

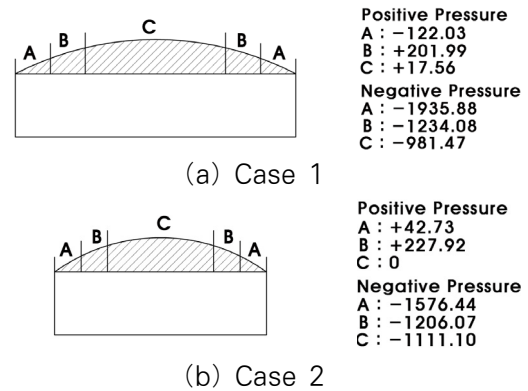
<Table 10> Interpolated pressure coefficient

KBC2016	Point	GC_{pe}	
		Case 1	Case 2
positive pressure	A	-0.26	0.09
	B	0.43	0.48
	C	0.04	0.00

KBC2016	Point	GC_{pe}	
		Case 1	Case 2
negative pressure	A	-3.56	-2.82
	B	-2.08	-2.02
	C	-1.55	-1.82

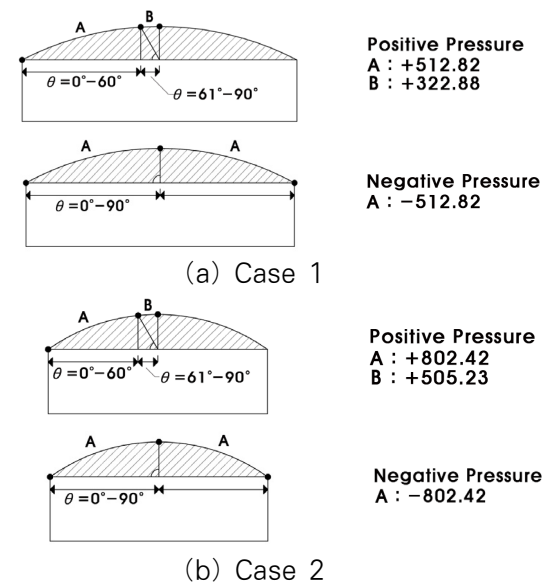
5.1.3 설계풍압

식 (4)를 통해 계산된 영역별 설계풍압은 <Fig. 9>와 같으며 내압의 경우 내압계수 -0.52를 적용하였다.



<Fig. 9> Design wind pressure based on Eq (4)

정압은 ASCE7-10 기준에 따라 피크외압계수를 각도에 따라 +0.9, +0.5를 적용시켰고 부압은 전체적으로 -0.9를 적용시켰다. 식 (5)를 통해 계산된 영역별 설계풍압은 <Fig. 10>과 같으며 정압은 내압 +261.16 그리고 부압은 내압 -261.16을 적용하였다.



<Fig. 10> Design wind pressure based on Eq (5)

5.2 제주월드컵경기장

5.2.1 계산조건

주 골조용과 동일하게 Case 1, 2, 3의 3가지 풍향 (풍향각 0°, 180°, 90°)에 대해 피크외압계수를 산출했으며 지붕의 모든 지점(A, B, C)의 설계풍압을 산출하였다. 또한 계산에 필요한 값은 풍동실험에 적용된 값과 동일하게 적용하였다^(11),12),14).

5.2.2 풍압계수

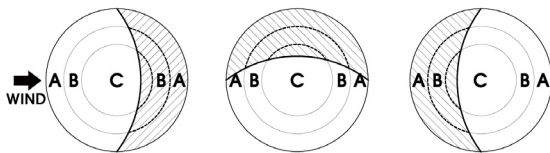
식 (4)를 이용해 설계풍압을 산출하기 위해 3가지 Case의 $h/d=0.17$, $f/d=0.19$ 비율에 따라 선형보간하여 모든 지점의 정압 및 부압의 피크외압계수를 산출하였으며, <Table 11>과 같이 정리하였다⁷⁾.

<Table 11> Interpolated pressure coefficient

KBC2016	Point	GC_{pe}
Positive pressure	A	0.78
	B	0.76
	C	0.07
Negative pressure	A	-2.15
	B	-1.91
	C	-2.03

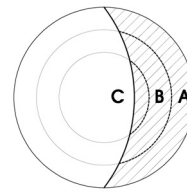
5.2.3 설계풍압

KBC2016 기준에 따르면 <Fig. 11>과 같이 어느 방향에서 바람이 불어와도 같은 풍압이 발생되는 것으로 나타난다⁷⁾.



<Fig. 11> KBC2016 GC_{pe} point

식 (4)를 통해 산출된 설계풍압은 <Fig. 12>와 같으며 내압계수는 ± 1.40 를 적용하여 값을 산출하였다.

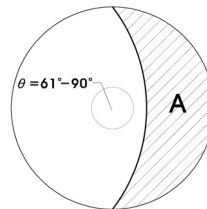


Positive Pressure
A : +341.97
B : +347.43
C : +236.39

Negative Pressure
A : -570.49
B : -531.56
C : -551.20

<Fig. 12> Design wind pressure based on Eq (4)

ASCE7-10 기준을 따를 경우 61~90°의 영역은 지붕이 존재하지 않으므로 +0.9와 -0.9의 외압계수만 적용하여 설계풍압을 산출하였다⁹⁾. 식 (5)를 통해 산출된 설계풍압은 <Fig. 13>과 같으며 내압은 ± 88.385 를 적용하였다.



Positive Pressure
A : +233.01
Negative Pressure
A : -233.01

<Fig. 13> Design wind pressure based on Eq (5)

산출 결과 식 (2)의 값이 식 (1)을 통해 계산된 값보다 부압에서 약 2.45배 낮은 결과를 보이며 정압 또한 1.49배 낮은 값을 보였다.

6. 풍동실험데이터

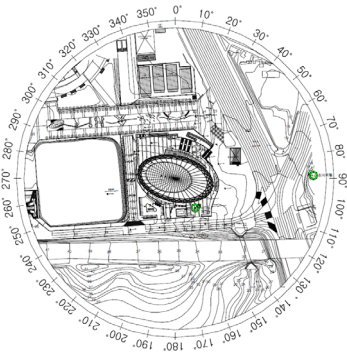
실험데이터는 대우건설기술연구소에서 수행한 풍압데이터를 활용하였다.

6.1 인천문학경기장 풍압실험¹³⁾

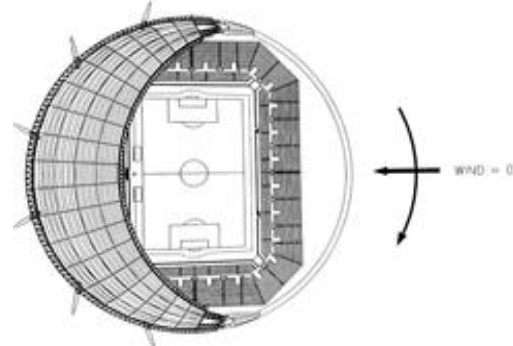
인천문학경기장은 지표면 조도 B(0°, 170~350°)와 C(10~160°)로 나누어 설정되었다. 실험에 사용된 단위는 N/m^2 이다. 실험조건은 <Table 12>에 나타냈으며, 풍방향은 <Fig. 14>와 같다.

<Table 12> Experimental condition¹³⁾

Ground surface roughness	B	C
Design wind speed(m/s)	27.90	34.90
Design velocity pressure(q_H)	474.83	742.99



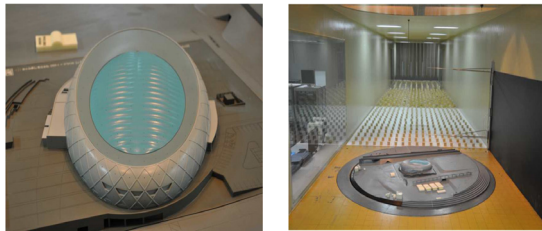
<Fig. 14> Wind direction



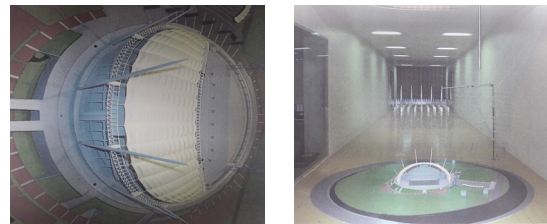
<Fig. 16> Wind direction

풍향은 바람이 불어오는 쪽을 기준으로 북쪽으로부터 시계방향으로 측정되었으며, 총 36개의 풍향이 10° 간격으로 풍압데이터를 측정하였다. 풍압모델은 <Fig. 15>와 같이 1/250 스케일 모형이 사용되었으며, 총 350개의 풍압측정점으로부터 풍압데이터가 측정되었다.

풍압모델은 1/350의 스케일로 제작되었으며, 모델에 설치된 측정점은 지붕면에 상향풍압 측정용 182개, 하향풍압 측정용 182개로 총 364개이다. 풍압모델 및 실험전경은 <Fig. 17>과 같다.



<Fig. 15> Pressure test model and wind tunnel test



<Fig. 17> Pressure test model and wind tunnel test

인천문학경기장은 각 풍압측정점에 풍향별 풍하중으로 실험된 값을 제시하며, 제주월드컵경기장은 각 풍압측정점의 풍압계수로 실험결과를 보여준다.

6.2 제주월드컵경기장 풍압실험¹⁴⁾

제주월드컵경기장은 지표면 조도 C에 대해 실험되었다. 실험에 사용된 단위는 kgf/m^2 이다. 실험조건은 <Table 13>에 나타났다.

<Table 13> Experimental condition¹⁴⁾

Ground surface roughness	C
Design wind speed(m/s)	50.70
Design velocity pressure(q_H)	160.7

풍향은 실험대상 건축물의 건설지를 중심으로 지붕이 가장 크게 개방된 동측방향을 0°로 설정하였으며 10°마다 풍향을 변화시켜서 합계 36개 풍향에 대해 실험을 실시하였다. 풍압모형의 실험풍향은 <Fig. 16>과 같다.

7. 풍하중 기준과 풍동실험 결과 비교

풍동실험의 주 골조용 풍압은 전 방향(10~360°)의 풍압을 고려한 하나의 값을 제시한다^{13), 14)}. 이에 따라 지붕의 측정점을 하중기준과 같이 영역별로 나누어 비교하였다. 외장재의 경우 풍향별 풍압을 제시하고 있으므로 하중기준 계산조건과 같은 방향에서 측정된 최대·최소값과 비교하였다.

인천문학 수영장의 주 골조용 설계풍압 비교를 위한 표는 <Table 14>와 같다. 산출된 값 중 KBC2016 기준이 다소 과소평가 되지만 전체적으로 실험결과와 비슷한 값을 보인다. 실험결과와 설계풍압은 영역별 최대의 값으로서 공간평균된 외압계수를 제시하는 기준을 고려하였을 때 B, C, D지점 또한 비슷한 값을 보인다.

<Table 14> Comparison of design wind pressure of main frame of Incheon Munhak Pool

Case	Wind load standard $P_r(N/m^2)$								Wind tunnel $P_r(N/m^2)$			
	KBC				ASCE				A	B	C	D
	A	B	C	D	A	B	C	D				
1	-271.23	-229.10	-396.94	-255.27	-581.37	-190.81	-408.43	-171.67	-388	-555	-952	-335
2	-312.55	-412.41	-726.96	-399.43	-852.78	-370.47	-789.87	-312.55	-358	-518	-952	-318

<Table 15> Comparison of design wind pressure of cladding of Incheon Munhak Pool

Case	Wind load standard $P_r(N/m^2)$						Wind tunnel test $P_r(N/m^2)$		
	KBC			ASCE			A	B	C
	A	B	C	A	B				
1	-122.03	+201.99	+17.51	+512.82	+322.88	+540	+410	+390	
	-195.88	-1234.08	-981.1	-512.82	-512.82	-180	-120	-60	
2	+42.73	+227.92	0	+802.42	+505.23	+570	+190	+130	
	-1576.44	-1206.07		-802.42	-802.42	-720	-790	-790	

<Table 16> Comparison of design wind pressure of main frame of Jeju Word Cup Stadium

Case	Wind load standard $P_r(kg/m^2)$								Wind tunnel $P_r(kg/m^2)$			
	KBC				ASCE				A	B	C	D
	A	B	C	D	A	B	C	D				
1	-	-	-495.22	-405.45	-	-	-509.23	+359.73	-	-	-472.70	-319.70
2	+355.06	-412.41	-	-	-408.79	-448.50	-	-	-319.70	-472.70	-	-
3	+355.06	-412.41	-495.22	-405.45	-408.79	-448.50	-509.23	+359.73	-171.90	-319.70	-472.38	-167.08

<Table 17> Comparison of design wind pressure of cladding of Jeju Word Cup Stadium

Case	Wind load standard $P_r(kg/m^2)$						Wind tunnel $P_r(kg/m^2)$		
	KBC			ASCE			A	B	C
	A	B	C	A					
1						+158.45	+80.67	+168.25	
						-722.829	-519.704	-215.82	
2	+341.97	+347.43	+236.39		+233.01	+443.21	+362.86	+457.83	
	-570.49	-531.56	-551.20		-233.01	-320.918	-281.70	-189.305	
3						+249.24	+314.32	+480.01	
						-217.10	-246.35	-374.27	

인천문학수영장의 외장재용 설계풍압 비교를 위한 표는 <Table 15>와 같다. ASCE7-10을 통해 산출된 값은 실험결과와 비슷한 값을 보이며, KBC2016을 통해 산출된 값은 실험결과에 비해 부압에서 최대 10.75배 높게 나타났다.

제주월드컵경기장의 주 골조 설계풍압을 비교한 표는 <Table 16>과 같으며 실험결과와 비슷한 값인 내압이 고려된 값으로 비교하였다. KBC2016의 A지점(풍상면 1/8)에서 정압, ASCE7-10의 D지점(풍하면 1/4)에서 정압으로 차이를 보였다.

제주월드컵경기장의 외장재 설계풍압을 비교한 표는 <Table 17>과 같다. Case 2(풍방향 180°)의 실험결과와 KBC2016 기준으로 계산된 값이 A지점(풍

상면 1/8)에서 1.26배 차이로 비슷한 값을 보였고, ASCE7-10의 경우 KBC2016 기준으로 계산된 값보다 2.45배 작은 값으로 나타났다.

8. 결론

밀폐형 및 개방형 대공간 구조물 지붕의 풍압계수 적용성을 검토하기 위해 KBC2016(AIJ2004), ASCE7-10(EN2005) 풍하중 기준 및 풍압계수를 통해 설계풍압을 산출하였으며, 이를 풍동실험 결과와 비교하였다.

1) 밀폐형 주 골조의 경우 KBC2016 기준의 외압 계수가 ASCE7-10에 비해 A지점(풍상면 1/8)에서

다소 과소평가되는 경향이 있지만 실험결과와 더 가까운 값을 제시하였고, 그 외 나머지 지점에서 두 기준 모두 풍동실험결과와 가까운 값을 보였다.

2) 밀폐형 외장재의 경우 KBC2016 기준으로 산출된 값이 실험결과에 비해 부압에서 최대 10.75배 과대평가되고 있는 반면, ASCE7-10 기준으로 산출된 값은 실험결과와 비슷한 값을 보였다.

3) 개방형 주 골조의 경우 내압이 고려된 경우의 값이 실험결과와 비슷한 값을 보였다. 풍동실험 결과 각 지점 모두 부압이 발생하는 것으로 나타나는 반면에 KBC2016의 A지점(풍상면 1/8)에서 정압, ASCE7-10의 경우 D지점(풍하면 1/4)에서 정압이 발생하는 하는 것으로 나타났다. 따라서 각 기준에서 제시하는 풍압계수로는 두 지점의 부압 발생 여부를 판단할 수 없었다.

4) 개방형 외장재의 경우 주 골조에서 과대평가되었던 KBC2016 기준으로 계산된 값은 Case 2(풍방향 180°)의 실험결과와 A지점(풍상면 1/8)에서 1.26배 차이로 비슷한 값을 보이는 반면, ASCE7-10 기준으로 산출된 값은 KBC2016보다 2.45배 작으므로 나타났다.

5) 밀폐형 돔 지붕에 대한 풍하중 기준은 KBC 2016 주 골조용과 ASCE7-10의 주 골조 및 외장재 모두 실험결과와 가까운 값을 보여 적용가능성을 보였지만, 개방형의 경우는 명확한 외압 및 내압계수를 제시하고 있지 않아 설계풍압을 산출하는데 어려움이 있으며, 계산된 값이 실험결과와 차이를 보여 현행 풍하중 기준으로 산출된 설계풍압은 신뢰하기 어려운 것으로 판단된다. 따라서 개방형 지붕의 개폐율에 따른 실험 및 연구를 통해 적절한 계수 값을 정의할 필요가 있을 것으로 사료된다.

감사의 글

이 논문은 서울과학기술대학교 교내학술연구비 지원으로 수행 되었습니다.

References

1. J. W. Kang, "Trend of Retractable Roof Structures Technology", Journal of Korean Association for Spatial Structures, Vol. 15, No. 4, pp.4-11 2015
2. J. W. Kang, "The Present and Future of Retractable Roof Structures", Journal of Korean Association for Spatial Structures, Vol. 14, No. 3, pp.24-31, 2014
3. S. W. Jin, "An Urgent Assignment for Sustainable Membrane Structures", Journal of Korean Association for Spatial Structures, Vol. 16, No. 2, pp.12-17, 2016
4. D. J. Cheon, S. W. Yoon, "A Study on the Analysis of Collapse Cases of Retractable and Membrane Roof Structures", Proceedings of KASS 2017 Spring Conference, Vol. 13, No. 1, pp.55-56, 2017
5. Y. S. Kim, "Comparison of Wind Pressure Patterns according to Roof Shapes of Stadium", Proceedings of WEIJK Symposium, pp.10-15, 1999
6. K. P. You, Y. M. Kim "Characteristic of Wind Pressure Distribution on the Roof of Hyperbolic Paraboloid Spatial Structures", Journal of Korean Association for Spatial Structures, Vol. 12, No. 3, pp.47-54 2012
7. Architectural Institute of Korea, Korean Building Code and Commentary(KBC2016), Kimoondang, 2016
8. Architectural Institute of Japan, AIJ Recommendations for Loads on Buildings, 1995, 2004
9. American Society of Civil Engineers, Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures(ASCE7-10), 2010
10. European Committee for Standardization, Eurocode 1: Action on structures-General actions-Part 1-4: Wind Action, European

Standard EN 1991-1-4:2005+A1 :2010.

11. B. S. Jeon, D. H. Gong, "Structural Design of Jeju World Cup Stadium", Journal of Korean Society of Steel Construction, Vol. 12. No. 4, pp.134-148, 2000
 12. J. H. Park, "B. S. Jeon, D. H. Gong, "Structural Design of Jeju World Cup Stadium", Proceedings of KASS Symposium, Vol. 8, No. 1, pp.181-190, 2011
 13. Daewoo Institute of Construction Technology, 2014 Incheon Asian Games Literature Stadium Construction Design Wind Tunnel Test Report, 2013
 14. Daewoo Institute of Construction Technology, Jeju Seogwipo World Cup Soccer Stadium Wind Tunnel Test and Wind load of Main Frame Report, 2003
- Received : October 19, 2017
 - Revised : November 07, 2017
 - Accepted : November 07, 2017