

고층구조물 외벽의 내풍설계를 위한 풍압평가

The Wind Pressure Evaluation on Exterior Wall for High-rise Buildings

이 규 응*
Lee, Kyu-Ung

김 재 응**
Kim, Jae-Ung

ABSTRACT

For using narrow site effectively, recently constructions of high-rise buildings have been increased. High-rise buildings are mainly governed by wind loads. Since wind flow is varied irregularly, the experimental method such as wind tunnel test is used to evaluate real wind loads. In this study, it is intended to estimate design wind pressure and amounts of material of cladding by AIK recommendations and wind tunnel test. Also, this study includes the investigation of reliability, suitability and economical efficiency in design of cladding of buildings by AIK recommendations and wind tunnel test by comparing and examining various results. Finally, it is concluded that not only AIK recommendations but also wind tunnel test should be considered to get the reasonable wind pressure acting on the cladding of high-rise buildings.

1. 서론

최근 부지의 효율적인 활용을 위하여 고층건축물의 건설이 날로 증가하고 있다. 고층건축물은 수직하중 보다 수평하중에 의한 영향을 더 많이 받기 때문에, 지진하중과 더불어 풍하중에 대한 관심이 커지고 있다. 내풍설계 중 외장재에 대한 부분은 주위 건축물과 거주자들의 안전성 및 쾌적성 확보를 위해 중요한 부분이다. 그러나 바람은 시간적·공간적으로 복잡하게 변동하기 때문에, 건축물에 작용하는 풍압을 해석적으로 산정하기에는 어려움이 있다. 최근 국내에서 풍하중에 관한 다양한 연구^{(1),(2)}들이 발표되고 있으나, 건축물의 외장재 설계용 풍압에 관한 연구는 아직까지 미흡한 실정이다.

본 논문에서는, 다양한 모델들을 대상으로 『건축물 하중기준』⁽³⁾(이하, 풍하중기준, 2000년 개정)과 풍동실험에 의한 풍압을 산정하여 그 특성을 비교·분석함으로써, 풍하중기준과 풍동실험의 신뢰성 및 적합성을 검토하고자 한다. 그리고 고층건축물의 외장재로 많이 사용되는 유리커튼월에 대하여, 풍하중기준과 풍동실험에 의한 풍압에 따라 각각 유리물량을 산출하여, 효율적인 외장재 설계에 대한 비교·검토를 하고자 한다.

2. 풍하중기준에 의한 풍압⁽³⁾

2000년도에 개정된 풍하중기준은 구조골조 및 지붕골조 설계용 풍하중과 외장재 설계용 풍하중을 구분하여 적용하도록 규정하고 있다. 풍하중기준에서는 다음과 같이 외장재 설계용 풍압을 산정하도록 하고 있다.

* 학생회원 · 동아대학교 건축공학과 석사과정

** 정회원 · 동아대학교 건축학부 교수

2.1 설계속도압

설계속도압은 건축물 설계용 풍하중을 산정하기 위한 평균풍속의 등가정적속도압을 말한다. 지표면으로부터 임의높이 Z 에 대한 설계풍속(V_z)과 설계속도압(q_z)은 다음 식과 같다.

$$V_z = V_0 \cdot K_{zr} \cdot K_{zt} \cdot I_w \quad (1)$$

$$q_z = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_z^2 \quad (2)$$

여기서, V_0 : 기본풍속, K_{zr} : 풍속의 고도분포계수, K_{zt} : 지형에 의한 풍속할증계수, I_w : 중요도계수, ρ : 공기밀도이다.

2.2 외장재 설계용 풍압

풍하중기준에서는 지붕면의 평균높이(h)가 20 m 이상인 건축물에 대하여 외벽의 외장재 설계용 풍압(p_c)을 식(3), (4)에 따라 산정하도록 규정하고 있다.

① 정압

$$p_c = q_z \cdot (GC_{pe} - GC_{pi}) \quad (3)$$

② 부압

$$p_c = q_h \cdot (GC_{pe} - GC_{pi}) \quad (4)$$

여기서, q_z : 지표면에서 임의높이 Z 에 대한 설계속도압, q_h : 지붕면의 평균높이 h 에 대한 설계속도압, GC_{pe} : 외장재용 가스트외압계수, GC_{pi} : 외장재용 가스트내압계수이다.

3. 풍동실험에 의한 풍압⁽⁴⁾

고층구조물의 외장재에 작용하는 풍압은, 대상 건축물의 주변상황과 형상에 따라 크게 달라진다. 따라서 많은 기·규준에서는 풍동실험 등과 같은 실험적인 수법에 의해 결정하도록 하고 있다.

3.1 기반 이론

3.1.1 상사법칙

풍동실험에는, 실제현상과 상사한 현상이 재현될 수 있는, 실험모형과 실험기류가 작성되어야 한다. 상사법칙은 이러한 목적을 달성하기 위한 이론적인 근거가 된다. 상사조건으로는 기하학적 상사조건, 운동학적 상사조건, 역학적 상사조건이 있다. 기하학적 상사조건은 대상건축물과 주변 상황 등에 대표되는 기하학적 형상 및 바람의 특성에 관한 길이 척도를 축척률에 따라 실험물과 일치시키는 것이다. 운동학적 상사조건은 실험에서의 바람의 성상을 실제와 같은 양상으로 건축물에 영향을 미치도록 축척률에 따라 일치시키기 위한 것이다. 그리고, 역학적 상사조건은 공기역학적 현상을 지배하는 여러 가지 힘의 비율을 실제와 실험에서 상사되도록 하는 것이다.

3.1.2 축척률

1) 모형 축척률

풍동실험에서 이용되는 모형의 축척률은, 일반적으로 난류의 스케일(L_x)과 건축물의 높이(H)와의 비를 실제구조물(full)과 실험모델(model)에서 일치시킴으로, 식(5)와 같이 구한다.

$$(L_x/H)_{full} = (L_x/H)_{model} \quad (5)$$

2) 풍속 축척률

풍동풍속은 풍동의 기류가 안정된 상태로 공급될 수 있고, 사용기기가 측정하고자 하는 물리량을 충분히 측정할 수 있도록 결정하는 것이 중요하다.

3) 시간 축척률

시간의 축척률은, 모형의 기하학적 축척률과 풍속의 축척률에 의해서, 식(6)과 같이 구해진다.

$$\frac{T_{model}}{T_{full}} = \frac{(B/V)_{model}}{(B/V)_{full}} = \frac{B_{model}/B_{full}}{V_{model}/V_{full}} \quad (6)$$

여기서, T : 시간, B : 대표길이, V : 대표풍속이다.

3.1.3 데이터 샘플링

외장재 설계용 풍압을 평가하기 위한 평균화시간은 0.5초~1초를 사용하고 있다. 풍동실험에서 평균화시간은 축척률에 따라 이에 상응하는 시간이 된다. 데이터 샘플링 간격은 평균화시간의 1/2보다 짧은 간격으로 한다.

3.2 외장재 설계용 풍압

기준속도압(q_H)과 측정된 풍압(P)으로부터 풍압계수(C_p)를 계산한다. 순간최대풍압계수($C_{p,max}$)와 순간최소풍압계수($C_{p,min}$)는 식(7), (8)에 의해 산정한다.

$$C_{p,max} = P_{max}/q_H \quad (7)$$

$$C_{p,min} = P_{min}/q_H \quad (8)$$

여기에서 구한 풍압계수는 외압계수이며, 내압계수는 풍하중기준을 따른다. 풍동실험에 의한 외압계수와 풍하중기준에 의한 내압계수(0 또는 -0.52)로부터 순간최대설계풍압 $W_{C,max}$ (이하, 정압)과 순간최소설계풍압 $W_{C,min}$ (이하, 부압)을 산정하며, 그 식은 다음과 같다.

$$W_{C,max} = q \times (C_{p,max} - C_{pi}) \quad (9)$$

$$W_{C,min} = q \times (C_{p,min} - C_{pi}) \quad (10)$$

여기서, q 는 설계속도압으로, 정압시 q_z 를 적용하고 부압시 q_h 를 적용한다.

4. 풍압평가 및 결과분석

4.1 풍압평가

본 연구를 위한 풍압평가 모델들은 부산지역에 위치하고, 개요는 표 1과 같다.

표 2. 평가모델 개요

구분	모델 1	모델 2	모델 3	모델 4	모델 5	모델 6	모델 7	모델 8	모델 9
높이	104m	98m	79m	79m	154m	150m	115m	80m	172m
층수	34층	32층	28층	29층	51층	50층	41층	25층	52층
용도	아파트	아파트	아파트	아파트	아파트	아파트	아파트	아파트	주상복합
정형성	정형	정형	비정형	비정형	비정형	비정형	비정형	비정형	비정형
검토벽면 수	2	2	5	4	4	4	7	4	2

4.1.1 풍하중기준에 의한 풍압

평가모델의 기본풍속(V_0)과 지형에 의한 풍속할증계수(K_{zt})는 각각 40 m/s, 1.0으로 한다. 평가모델 주변의 지표면 상태가 상이하어 풍향에 따라 노풍도구분이 다를 경우에는 불리한 경우를 적용한다. 평가모델의 노풍도구분과 중요도계수는 표 2와 같고, 노풍도구분에 따라 풍속의 고도분포계수(K_{zr})를 구한다.

표 2. 노풍도구분 및 중요도계수(I_w)

구분	모델 1	모델 2	모델 3	모델 4	모델 5	모델 6	모델 7	모델 8	모델 9
노풍도구분	B, C	B, C	B	B	C	C	B	C	B, D
I_w	1.0	1.0	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1

위의 각 계수들로부터 식(1), (2)에 의해 설계풍속과 설계속도압을 산정한다. 식(3), (4)에 유효수압면적을 1 m^2 이하인 경우로 가정한 가스트외압계수(GC_{pe})와 가스트내압계수(GC_{pi})를 적용하여 풍하중기준에 의한 외장재 설계용 풍압을 산정한 결과의 예를 들면 그림 1의 (a)와 같다.

4.1.2 풍동실험에 의한 풍압

본 연구의 풍동실험에서는 Eiffel형 대형 경계층 풍동장치가 사용되었다.

1) 풍동의 상사법칙

(1) 기하학적 상사조건

모형의 축척률은 풍동의 규모와 폐쇄율을 고려하여 결정되었다. 그리고 기하학적 상사조건의 파라미터인 난류스케일과 건축물 높이의 비(H/L_x)는 무차원화 파워 스펙트럼 밀도를 일치시키는 것에 의해 상사조건을 만족하는 것으로 본다. 이와 마찬가지로, 기류의 경계층 높이도 난류강도의 분포를 일치시킴으로서 그 조건을 만족한다고 가정한다.

(2) 운동학적 상사조건

각 노풍도구분에 대하여 풍동 내 형성된 평균풍속과 난류강도의 연직분포를 이론식과 비교해 본 결과 비교적 잘 일치하고 있어 평균풍속과 난류강도는 상사조건을 만족하는 것으로 본다. 또한 평가모델의 최상층부근에서 측정된 변동풍속 난류의 파워 스펙트럼 밀도를 Karman형의 스펙트럼 밀도와 비교해 거의 일치함이 확인되었다.

(3) 역학적 상사조건

각진 물체에 대해서는 박리점의 위치가 우각부에 고정되기 때문에, 물체 주위의 흐름상태는 레이놀즈 수의 영향을 작게 받는다. 풍동실험과 실제현상 간에 레이놀즈 수의 차이가 있더라도 실험결과에는 그다지 영향이 없을 것으로 판단된다. 그러므로 역학적 상사조건을 만족하는 것으로 가정한다.

2) 축척률 결정

풍동실험의 축척률은 모형치수, 풍속, 시간에 따라 결정한다. 측정기기의 성능과 상사법칙을 고려하여 축척률이 결정되었다.

측정된 풍압을 식(7), (8)에 적용하여 풍압계수를 구하고, 이 값과 식(9), (10)에 의해 외장재 설계용 풍압을 산정한 결과의 예를 들면 그림 1의 (b)와 같다.

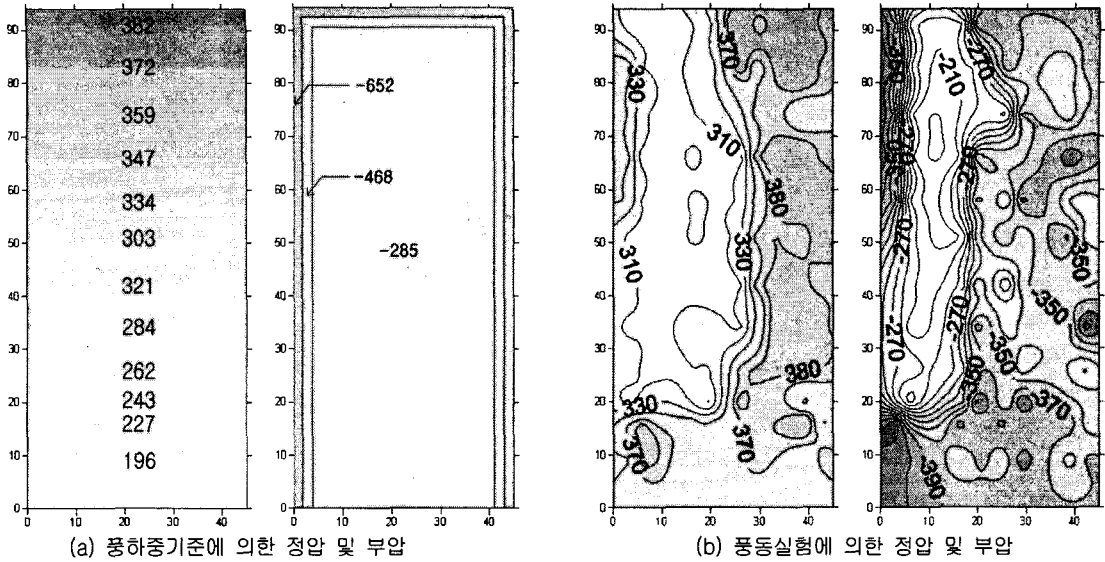


그림 1. 풍압분포 산정 예(모델 2의 배면 ; kgf/m^2)

4.2 결과분석 및 고찰

(1) 풍압분포

9가지 모델들에 대한 풍하중기준과 풍동실험에 의한 풍압분포를 분석하면 다음과 같다.

① 풍하중기준에 의한 풍압분포

일반적으로, 벽면이 정압을 받는 경우, 대기경계층 내에서의 풍속은 지표면에서 상공으로 갈수록 증가하므로, 풍압은 지표면으로부터의 높이가 높을수록 커진다. 벽면이 부압을 받는 경우, 벽면 모서리에서는 바람의 박리로 인하여 저압부가 형성됨에 따라 큰 부압이 적용하고 있다.

② 풍동실험에 의한 풍압분포

벽면이 정압을 받는 경우, 국부적으로 큰 풍압으로 인해 풍압분포가 벽면의 높이에 따라 규칙성을 띄지 않는다. 다만, 평가모델의 모든 벽면을 대상으로 벽면내 최대풍압 발생지점을 살펴볼 때 대체적으로 건축물 높이의 2/3~3/4지점에서 최대풍압이 발생하는 경향이 있다. 그러나 평가모델의 일부는 벽면의 최상부에서 최대풍압이 나타나기도 하고, 드물기는 하나 하층부에서 최대풍압이 발생하는 경우도 있다. 벽면이 부압을 받는 경우, 모서리 부분에 벽면내 최대부압이 발생하는 경향이 있기는 하나 벽면의 모서리를 따라서 일정하게 큰 부압이 발생하지는 않는다. 그리고 벽면 중앙부에서 국부적으로 큰 부압이 발생하기도 한다. 이와 같이 건축물 벽면에 작용하는 풍압의 분포는 풍하중기준에서 제시하고 있는 바와 같이 규칙적인 성향이 나타나지 않는다. 이는 풍동의 여러 장치를 거쳐 생성된, 난류가 작고 안정된 풍동기류가 주변 지형 및 건축물의 모형 등에 의해 난류화 됨에 따라 규칙적인 성향이 나타나지 않는 것으로 판단된다.

(2) 풍압오차 분포

풍하중기준에 대한 풍동실험의 풍압오차 분포의 산정 예는 그림 2와 같고 전반적인 성격을 살펴보면 다음과 같다. 여기서 풍압오차는 다음 식에 따라 산정한다.

$$\text{풍압오차(\%)} = \frac{\text{실험값} - \text{기준값}}{\text{기준값}} \times 100 \quad (11)$$

여기서, 기준값은 풍하중기준에 의한 풍압을, 실험값은 풍동실험에 의한 풍압을 말한다.

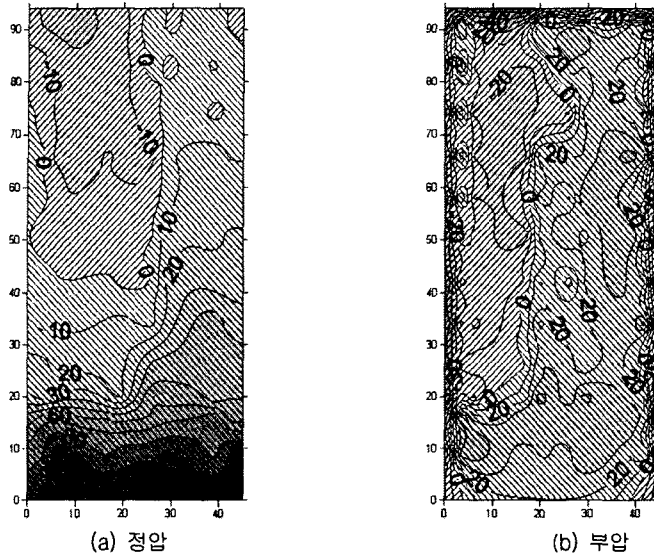


그림 2. 풍압오차 분포 산정 예(모델 2의 배면; %)

① 벽면이 정압을 받는 경우

전체적으로, 건축물의 상층부에서는 풍하중기준이 풍동실험에 비해 과대평가하는 경우가 많다. 중층부에서는 풍동실험에 의한 풍압이 풍하중기준에 의한 것보다 크게 나타나는 경향이 있다. 그리고 하층부에서는 풍동실험에 의한 풍압이, 중층부에 비해 크게 차이 나지 않음에 따라, 대체로 풍하중기준에서 제시하는 것보다 크게 나타난다. 오차크기의 차이는 있으나 높이에 따른 풍압오차의 경향이 있는 것은, 풍하중기준에 의한 풍압이 높이에 따라 분포하고 풍동실험에 의한 최대풍압이 건축물의 2/3~3/4높이에서 발생하는 경향이 있기 때문이다.

② 벽면이 부압을 받는 경우

전반적으로, 풍동실험에 의한 최대풍압이 벽면 모서리 부분에 크게 나타나는 경향이 있기는 하나 풍하중기준에서 제시하는 풍압에 비해 작게 나타나는 경우가 많다. 그러나 벽면 중앙부에서는 국부적인 큰 풍압으로 인해 풍하중기준에 대한 풍동실험의 풍압오차가 크게 발생하는 경우도 빈번하다.

(3) 외장재 설계

외장재 설계를 통하여 풍하중기준과 풍동실험에 의한 풍압을 비교·검토하기 위하여 각각에 대해 최대절대 풍압을 산정하고, 유리두께를 결정한다. 여기서 최대절대풍압은 특정 지점에 대한 정압과 부압의 절대값 중 큰 값을 말한다. 표 3은 유리두께별 허용풍압과 단가를 나타낸다.

표 3. 유리두께별 허용풍압과 단가

유리두께	5 mm	6 mm	8 mm	10 mm	12 mm
허용풍압(kgf/m ²)	234	401	500	729	1014
단가(원/m ²)	13,800	17,000	24,200	31,900	36,300

(단, 유리종류는 강화유리, 창 의 모듈은 1.8 m×2.4 m로 가정한다.)

평가모델들의 벽면을 5m×5m로 구획하여 구역 내 최대절대풍압과 이에 대한 유리두께를 결정하였는데, 그 산정 예는 그림 3과 같다. 표 4는 전체 모델들에 대한 풍하중기준과 풍동실험에 의한 유리물량 및 가격을 계산하고 비교한 결과를 나타내고 있다. 표에서 가격은 유리두께에 따른 노무비 등 기타 비용을 고려하지 않은 순수 유리가격이나 일반적으로 전체 창호공사비도 이에 비례하는 경향을 갖는다.

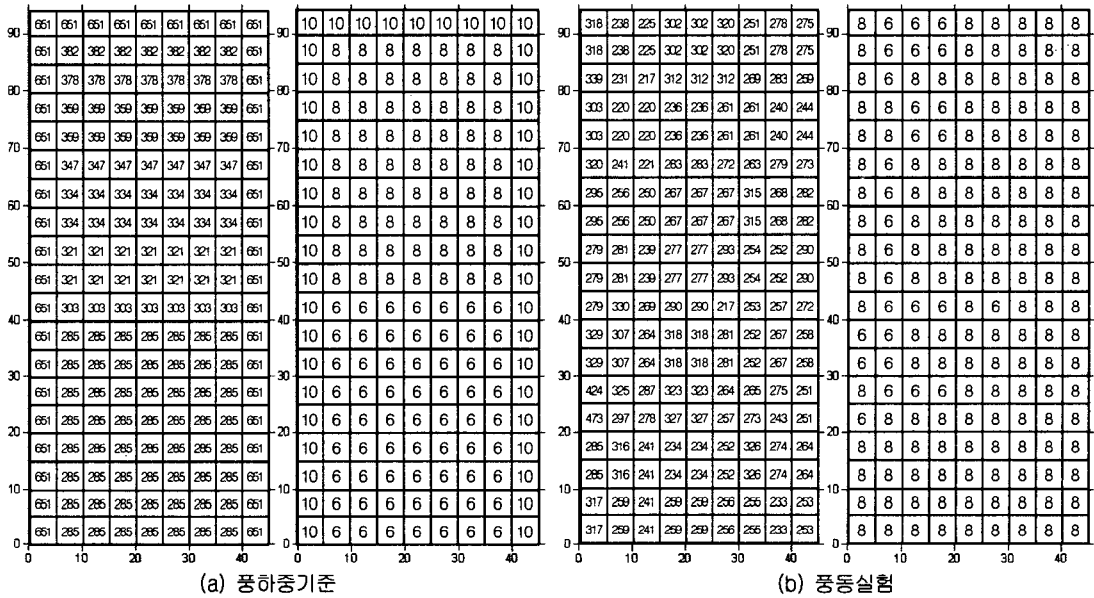


그림 3. 구역별 최대절대풍압 및 유리두께 산정 예(모델 2의 배면 ; kgf/m^2 , mm)

표 4. 풍하중기준과 풍동실험에 의한 유리물량 및 가격

모델(검토면 수)	풍하중기준		풍동실험		풍동실험 / 풍하중기준 (%)	
	물량(m^3)	가격(천원)	물량(m^3)	가격(천원)	물량비	가격비
모델 1(2면)	84.68	262,178	88.77	274,656	105	105
모델 2(2면)	65.14	192,528	58.93	173,368	90	90
모델 3(5면)	45.42	151,417	46.64	154,614	103	102
모델 4(4면)	35.85	119,591	38.39	127,850	107	107
모델 5(4면)	187.24	580,319	131.70	397,382	70	68
모델 6(4면)	174.24	560,166	130.15	430,026	75	77
모델 7(7면)	114.76	357,579	106.48	324,603	93	91
모델 8(4면)	62.63	189,668	182.20	159,277	87	84
모델 9(2면)	189.70	589,549	182.20	576,277	96	98
합계	959.72	3,002,995	837.83	2,617,871	87	87

풍동실험과 풍하중기준에 의한 풍압으로 설계한 경우를 비교해 볼 때, 풍동실험에 의한 경우가 풍하중기준에 의한 경우에 비해 물량 및 가격이 평균적으로 약87%정도가 소요된다. 모델 1, 모델 3 그리고 모델 4의 경우 풍동실험에 의한 경우가 풍하중기준에 의한 경우보다 물량과 가격이 다소 많이 소요되는 경우도 있으나 그 차이가 크지는 않다.

건축물에 작용하는 바람의 특성상, 풍하중기준에서는 국부적으로 높거나 낮은 풍압을 고려할 수 없으나, 풍동 실험의 경우 평가대상의 주변환경이나 건물배치 및 건물형태가 실험에 반영되므로 국부적으로 나타나는 불규칙한 풍압의 평가가 가능하다. 이에 따라 풍동실험은 풍하중기준에 비해 보다 실제적이고 효율적인 설계가 가능하므로 외장재 비용을 절감할 수 있을 것으로 판단된다.

5. 결론

최근 건축물이 고층화되면서 바람의 영향을 많이 받는 건축물이 증가하고 있다. 바람은 건축물의 주변환경이나 형상에 따라 유동특성이 크게 달라진다. 따라서 해석적인 방법으로 그 흐름을 추정하는 데는 한계가 있다. 본 연구에서 풍하중기준과 풍동실험에 의한 풍압을 비교·분석하고, 각각의 경우에 대하여 외장재를 설계하여 비교·검토함으로써 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 풍압분포의 성격을 살펴보면, 정압의 경우 풍하중기준에 의한 풍압은 높이에 따라 증가하여 최상부에서 최대풍압이 발생하나, 풍동실험에 의한 풍압은 건축물 높이의 2/3~3/4지점에서 최대풍압이 발생하는 경우가 많다. 부압의 경우 풍하중기준에서는 바람의 박리를 고려하여 벽면 모서리부분에 큰 부압이 적용하고 있으나, 풍동실험에서는 벽면 모서리에서 최대부압이 발생하는 경우가 많으나 벽면 중앙부에서도 국부적으로 큰 부압이 발생하기도 한다.
- (2) 풍압오차의 성격을 살펴보면, 정압의 경우 상층부에서는 풍하중기준이 풍동실험에 비해 과대평가를, 중층부에서는 과소평가를 하고 있는 경향이 있으며, 하층부에서는 풍동실험에 의한 풍압이 대체로 풍하중기준에서 제시하는 것보다 크게 발생한다. 부압의 경우 벽면 모서리에서는 풍하중기준이 풍동실험에 비해 과대평가하고 있고 벽면 중앙부에서는 대체로 풍하중기준에 의한 풍압이 풍동실험에 의한 풍압보다 작게 나타난다.
- (3) 풍동실험에 의한 풍압으로 외장 마감재인 유리커튼월을 설계할 경우 풍하중기준에 의해 설계할 경우보다 가격 면에서 약 87%가 소요되는 것으로 나타났다. 풍동실험의 경우 실험비용의 부담은 있으나 국부적으로 높거나 낮은 풍압을 실제적으로 반영할 수 있어 결과적으로는 안전하고 경제적인 설계가 가능할 것으로 판단된다.
- (4) 이상과 같이 고층 건축물의 외장재 설계를 위한 풍압 산정 시, 풍하중기준에만 의존할 경우 국부적인 풍압특성이 고려되지 못하므로 안전설계상의 문제가 발생할 수 있으며, 경제적인 면에서도 효율적이지 못하다. 따라서 풍동실험 등과 같은 실험적인 수법을 통해 외장재 설계용 풍압평가를 보완하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

참고 문헌

1. 김동우, 조상규, 하영철, “하중기준과 풍동실험에 의해 평가한 건축물의 풍하중에 관한 고찰”, 대한건축학회 학술발표논문집 제22권 제1호, pp.195-198
2. 김미영, “고층 건축물 외장재의 내풍설계에 관한 연구”, 숭실대학교 대학원 석사학위논문, 1995
3. 대한건축학회, 건축물 하중기준 및 해설, 태림문화사, 2000
4. 풍동실험법 가이드 라인 연구 위원회, 실무자를 위한 건축물 풍동실험 가이드북, 김영문 역, 한국풍공학회, 대전, 1998
5. 大熊武司, 神田順, 田村辛雄 편, 건축물의 내풍설계, 김영문, 윤성원, 정영배 역, 도서출판한림원, 서울, 2002