

내풍설계(耐風設計)를 위한 건축물의 풍동실험 Wind Tunnel Test for Wind Resistant Building Design



허영철
금오공과대학교 교수

1. 머리말

우리나라는 지정학적으로 태풍의 영향을 받는 위치에 놓여있다. 기상청 통계에 따르면 평균적으로 3개 정도의 태풍이 매년 우리나라를 내습하는 것으로 알려져 있다.¹⁾ 특히 최근 2002년에는 태풍 '루사'가, 2003년에는 태풍 '매미'가 우리나라 기상 관측 이래 최대의 풍속을 연이어 갱신하면서 제주도, 영남, 호남 일원을 강타하여 엄청난 인적·물적인 피해를 발생시켰다.

이처럼 우리나라가 태풍의 상습 피해지역임에도 불구하고, 건축물의 내풍설계는 내진설계의 그늘에 묻혀 일부의 건축물을 제외하고는 설계자가 큰 관심을 가지지 않았다. 그러나, 최근 초고층주택, 대형 전시·관람·운동시설 등과 같이 구조적인 내력의 안전성 확보는 당연하고, 나아가서 거주성(居住性)이나 사용성(使用性)이 그 가치를 좌우하는 건축물의 건설이 급속하게 늘어나면서 건축인 등이 관심을 가지기 시작하게 되었다. 특히 2002년 태풍 '루사'로 제주도월드컵 경기장의 막구조가 파손되었고, 2003년 태풍 '매미'로 인하여 부산 아시아드경기장의 막구조가 파손된 것이 언론에 보도되면서 내풍설계의 중요성을 일반인들도 인식하기 시작하였다.

건축물의 내풍설계는 그리 간단하지가 않다. 내풍설계에서는 외력의 기본이 되는 표준적인 기준풍속을 결정하여 두었다고 하더라도 그것만으로 건축물에 가해지는 하중 및 건축물에 발생하는 변위·진동을 예측할 수는 없다. 왜냐하면, 건축물이 받는 풍압·풍력은 건축물의 형상 및 주변의 상황에 따라 크게 달라지기 때문이다. 이런 이유 때문에 현재까지 해석적 방법만으로 내풍설계를 수행할 수 있는 방법은 확립되어있지 않는 실정이다. 따라서 건축물의 내풍설계를 합리적으로 수행하기 위해서는 부득이하게도 풍동실험을 실시하여

풍압·풍력을 파악하고, 응답을 평가하여 외장재 및 골조를 설계하는 가장 실용적인 방법이라고 할 수 있다.

여기서는, 해외의 풍하중기준과 우리나라의 풍하중기준에서 건축물의 내풍설계를 위하여 어떤 경우에 풍동실험을 실시하도록 규정하고 있는지를 간략하게 소개하고, 내풍설계를 달성하기 위하여 왜 풍동실험을 실시해야만 하는지에 대한 이유와 풍동실험의 종류 및 풍동실험결과의 활용방법 등을 간략하게 설명하고자 한다.

2. 하중기준에 명시된 풍동실험 대상 건축물

2.1 해외기준

「ANSI/ASCE 7-95」²⁾에서는 다음과 같은 경우에 풍동실험을 실시하도록 규정하고 있다.

- 1) 비정형적인 기하학적 형상을 가진 건축물인 경우
- 2) 풍직각방향진동, 비틀림진동, 외류진동, 공기력불안정진동이 발생할 것으로 예상되는 건축물인 경우
- 3) 건물높이 45m 이상으로 고유진동수가 1 Hz 이하인 유연건축물인 경우
- 4) 차폐 및 수축효과가 심할 것으로 우려되는 건설지점인 경우

「ISO 4354-1997(E)」³⁾에서는 다음과 같은 경우에 건축물에 대한 풍동실험을 실시하도록 규정하고 있다.

- 1) 유연하고 세장하며 높고 가벼운 건축물
- 2) 비정형적인 기하학적 형상을 가진 건축물

2.2 한국

「건축물의 구조기준 등에 관한 규칙(2000년 건설교통부 고시 제

2000-153호)」 및 「건설교통부 제정 건축물 하중기준 및 해설(2000년)」⁴⁾에서는 다음과 같은 조건인 경우에 풍동실험을 실시하여 그 결과에 의거하여 해석하도록 규정하고 있다.

- 1) 강풍의 작용에 의해 풍직각방향진동 및 비틀림진동, 와류진동, 공기력불안진동이 예상되는 세장한 고층건축물의 구조골조용 풍하중을 산정할 경우. 여기서, 세장한 건축물이란, 건축물의 높이를 H , 폭을 B , 깊이를 D , 외경을 D 라고 할 때, 사각형평면인 경우에는 $H/\sqrt{B \times D} \geq 3$ 이고, 원형평면인 경우에는 $H/D \geq 7$ 일 때를 말한다.
- 2) 장스팬의 현수교나 공기막지붕 등과 같이 경량이며 면외강성이 낮아 공기력불안진동의 우려가 있는 구조물의 지붕골조용 풍하중을 산정할 경우
- 3) 규모, 공법에 따른 진동으로 기준을 적용할 수 없는 외장재의 풍하중을 산정할 경우
- 4) 평면 및 입면이 비정형인 건축물의 외장재 설계용 풍압계수 및 구조골조 설계용 풍력(압)계수를 설정하고자 하는 경우

현재 우리나라의 하중기준에서 위와 같은 4가지 조건에 해당되는 건축물에 대하여 풍동실험을 실시하도록 규정하고 있는 것은 다음과 같은 이유에 기인한다.

1), 2), 3)의 경우에는 바람에 의하여 건축물에 발생하는 거동을 예측하기가 불명확하기 때문에 거동분석을 해석적인 방법으로 예측하기는 불가능하다. 따라서 풍동실험을 실시하여 진동으로 발생하는 건축물의 최대변위를 예측하여 건축물의 내력 안정성을 확보하고, 또한 진동으로 발생하는 건축물의 가속도 레벨을 예측하여 거주자의 사용성을 확보하기 위해서이다.

4)의 경우에는 건축물의 형상에 따라 풍압계수 및 풍력계수가 일정하지 않게 된다. 따라서 풍동실험을 통해 건축물 각부 및 전체의 풍압(력)계수를 정확히 예측하여 경제적, 합리적인 외장재 및 골조 설계를 가능하게 하기 위함이다.

특히, 비정형적인 건축물의 풍압계수 및 풍력계수는 우리 기준 및 세계 각국의 풍하중 기준에 규정되어 있지 않다. 따라서 실제 설계를 할 때에는 설계자가 안전을 고려하여 그 값을 과다하게 사용할 우려가 있다. 그러한 경우에는 외장재 및 구조부재의 경비를 상승시키게 되는 요인이 될 것이며, 반대로 낮게 사용할 경우에는 파괴에 이르게 될 수도 있는 위험의 소지가 있다. 따라서 풍동실험에 의하여 건축물 각부의 풍압계수를 정확히 예측하여 이에 따라 외장재를 설계하고, 건축물 전체에 대한 풍력계수를 예측하여 건축물의 골조를 설계하며, 건축물에서 발생하는 진동기속도를 예측하여 거주자의 사용성

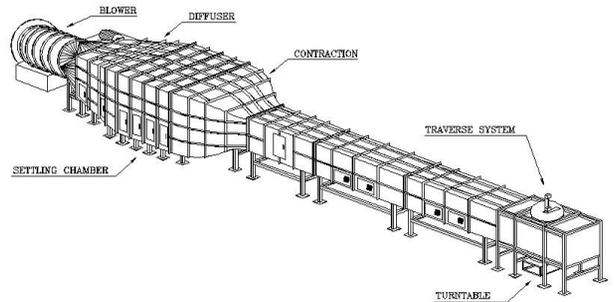
지 확보하도록 하는 것이 가장 경제적이고 합리적인 방법이라 할 수 있을 것이다.

참고로, 풍직각방향의 진동이 발생할 우려가 있어 풍동실험을 실시하여야할 조건인 건축물의 간단한 예를 들어보면, 아파트인 경우는 25층(높이 87.5 m, 폭 50 m, 깊이 15 m, 층고 3.5 m)정도, 오피스텔인 경우에는 30층 오피스텔(높이 105 m, 폭 40 m, 깊이 25 m, 층고 3.5 m)정도에 해당한다.

3. 풍동실험

3.1 풍동(wind tunnel)

풍동은 송풍기(blower)에서 발생시킨 바람을 확산부(diffuser), 정류격자(settling chamber), 축류부(contraction)를 통하여 공간적으로 난류성분이 적고 안정된 기류를 측정부분에 불어 보내기 위한 장치로서, 회류형(回流型, closed circuit type)과 개방형(開放型, open circuit type)이 있다. 개방형은 <그림 1>에 나타난 것처럼 공기 흡입구와 토출구가 개방되어 있는 형식이고, 회류형은 공기가 순환하는 형식이다.



<그림 1> 개방형 풍동

풍동에서 재현된 바람은 기본적으로 자연에서의 바람과 그 성질이 같아야한다. 그러나 풍동은 실험실마다 그 모양 및 크기가 다양하기 때문에 각기 풍동이 가진 풍동의 성능 또한 달라진다. 따라서 풍동에서 재현된 바람이 자연풍과 같아지기 위해서는 다음과 같은 조건을 만족하도록 하여야 한다.⁴⁾

- 1) 풍동내의 풍속의 고도분포는 건설 현지의 자연 대기경계층의 조건에 적절하도록 재현해야 한다.
- 2) 풍동테스트 단면 내의 난류강도의 분포는 건설현지의 조건에 적절하도록 재현해야 한다.
- 3) 설계건축물은 물론 주변의 건축물 및 지형조건은 적절하게 재현해야 한다.
- 4) 풍동 내 설계건축물 및 주변 모형에 의한 단면 폐쇄율은 풍동의

테스트 단면에 대하여 8% 미만이 되도록 하여 실험해야 한다.

- 5) 풍동내의 압력의 분포는 일정하도록 해야 한다.
- 6) 레이놀즈수에 의한 영향은 최소화하여 실험한다.
- 7) 풍동실험에 사용되는 계측기는 해당실험에 적절한 응답특성을 만족해야 한다.

3.2 풍동실험의 종류

건축물의 내풍설계를 위하여 실시하는 풍동실험에는 풍압실험, 풍력 실험, 공력진동실험이 있고, 이외에 건축물이나 특수한 지형의 주변에 대한 바람의 흐름 및 증감 상태를 파악하기 위한 풍환경실험으로 대별 할 수 있다. 여기서는 내풍설계의 관점에서 풍환경실험은 생략한다.

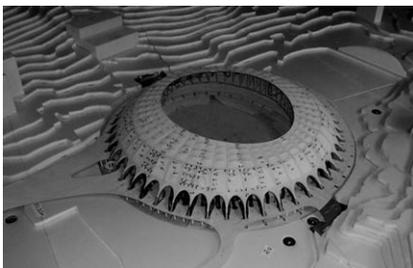
3.2.1 풍압실험(wind pressure test)

풍압실험은 모형에 작용하는 풍압력을 풍압계에 의하여 측정하는 실험이다. 이 실험은 건축물의 외장재용 풍하중을 평가하는 것이 목적이다. <사진 1>과 같이 밀폐된 건축물인 경우에는 외벽면에 작용하는 풍압계수를 평가하고, <사진 2>와 같이 개방된 구조물인 경우에는 외장재 윗면과 아랫면에 작용하는 풍압력의 차에 대한 풍압계수를 평가하여, 궁극적으로는 외장재용 풍하중을 제시한다.

실험은 대상 건축물의 모형 및 주변 모형을 턴테이블 위에 고정시키고, 모형 벽면에 설치한 다수의 풍압측정공을 비닐튜브로 턴테이블 하부에 설치된 다점풍압계에 연결한 후 기준속도압과의 차압으로 풍압을 측정한다. 모형은 일반적으로 강한 아크릴판을 사용한다.



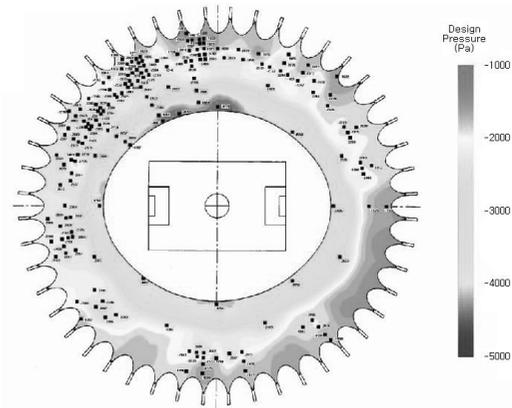
<사진 1> 밀폐된 건축물



<사진 2> 개방된 건축물

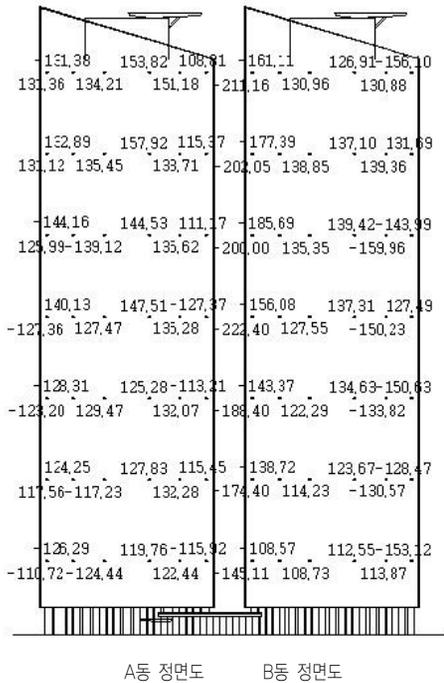
【풍압실험 결과의 고찰】

<그림 2>는 <사진 2>에 나타난 개방형 건축물인 경기장 막지붕 모형의 윗면과 아랫면에 각각 200여개의 풍압측정공을 설치한 후, 풍압실험을 실시하여 막지붕을 위로 들어 올리는 풍압(상향, -)을 측정 지점별로 구한 후 등풍압을 조닝하여 나타난 설계풍압분포도이다. 최대풍압은 상부 막구조의 단부 주변에서 발생하고, 그 값은 -4,817 Pa(-492 kgf/m²)이다. 반면, 막지붕을 밑으로 내려 누르는 풍압(하향, +)은 들어 올리는 풍압에 비하여 그 값이 작으며 3,232 Pa(+330 kgf/m²) 정도에 달한다. 일반적으로 이와 같은 형상을 가진 개방형 막지붕인 경우에는 막지붕을 들어 올리는 풍압이 내려 누르는 풍압에 비하여 월등하게 큰 값을 나타낸다. 설계자는 이점에 주의하여야 할 것이다.



<그림 2> 막지붕의 풍압분포도(단위: Pa)

<그림 3>은 <사진 1>에 나타난 밀폐형 건축물 1개동의 벽면에 200여 개소의 풍압 측정공을 설치하여 풍압실험을 실시한 후 벽면에 작용하는 풍압계수를 구하고, 그 결과로부터 외장재 설계용 풍압력을 평가하여 나타난 것이다. 외장재의 설계용 최대풍하중은 부압의 경우 B동 정면의 1H/2 지점에서 -222.40 kgf/m², 정압의 경우 B동 우측면의 2H/3 지점에서 170.75 kgf/m²으로 평가되었다. 건물 전체의 외장재를 동일한 재료와 두께로 설계하고자 하는 경우에는 부압 -222.40 kgf/m², 정압 170.75 kgf/m²으로 설계하면 되고, 만약 외벽을 부분별로 분할하여 외장재를 설계하고자 하는 경우는 <그림 3>에 주어진 각부 설계용 풍하중을 조닝하여 사용하면 된다. 일반적으로 밀폐형 건축물인 경우에는 부압이 정압에 비하여 크다.

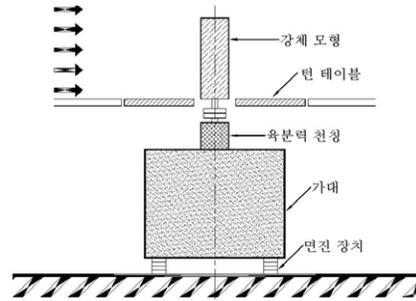


(그림 3) 밀폐형 건축물의 외장재 설계용 풍하중(단위: kgf/m²)

3.2.2 풍력실험(wind force test)

풍력실험은 건축물 또는 부재 등의 전체에 작용하는 풍하중을 평가하기 위하여 행해지며, 설계대상 건축물의 구조골조용 설계자료인 건축물 주축에 대한 풍력, 전도모멘트 및 수직축에 대한 비틀림모멘트를 구하는 것이 주목적이다. 또한, 자력진동(自勵振動, self-excited vibration) 등으로 인하여 대변형이 발생할 우려가 없는 건축물인 경우에는 선형응답의 범위 내에서 변동풍력의 시계열 데이터로부터 얻어진 변동풍력의 파워스펙트럼을 이용하여 건축물의 응답변위 및 응답가속도를 해석적 방법인 스펙트럼모드해석법(Spectral Modal Analysis Method)으로 구하여 거주자의 사용성을 평가하거나, 변동풍력의 파워스펙트럼으로부터 시계열 데이터를 발생시켜 제진장치의 효과를 검토할 수도 있다.

실험은 (그림 4)에 나타난 것과 같이 대상 건축물의 모형을 풍동의 턴테이블 하부에 설치된 측정기기(주로, 6분력천칭, 6 component force balance) 위에 고정시키고, 고정된 모형전체에 작용하는 풍력(항력, 양력, 전도모멘트)을 측정한다. 모형은 풍력에 의해 발생하는 풍력만을 정확하게 측정하기 위해 진동하지 않는 강제모형(剛體模型)을 이용한다.



(그림 4) 풍력측정장치의 개요

실험으로부터 측정된 풍력에 의하여 건축물에 작용하는 풍하중(층전단력, 층전도모멘트, 층비틀림모우멘트)을 산정할 수 있고, 측정된 풍력이 건축물에 작용한 경우의 응답변위, 응답가속도의 해석도 가능하다. 그러나, 바람에 의하여 건축물이 진동하고 그 때문에 생기는 부가적인 공기력의 효과는 풍력실험으로 예측할 수 없다. 따라서, 부가적 공기력의 효과를 무시할 수 없는 건축물(예를 들면, 극히 가볍고 세장한 탑상형의 건축물)인 경우에는 3.2.3에서 기술하는 공력진동실험에 의하여야 한다.

바람에 의하여 발생하는 부가적 공기력의 효과를 무시할 수 없는 건축물을 제외하고는 풍력실험결과만을 이용하여 내풍설계를 수행할 수 있다. 또한, 실험대상 건축물의 구조특성이 명확하지 않은 시점에서 건축물의 형상이 정해지면 실험을 수행하여 건축물에 작용하는 풍하중을 산정할 수 있고, 기본설계단계에서 건축물의 형상이 정해져 있지 않은 경우에도 여러 가지 안에 대하여 풍력실험을 실시하여 그 특성을 비교 검토할 수 있으며, 건축물의 구조특성이 정해지면 곧바로 응답도 평가할 수 있는 장점이 있다.

따라서, 바람에 의하여 발생하는 부가적 공기력의 효과를 무시할 수 있는 건축물에 대한 구조골조용 풍하중을 산정할 경우에는 실험대상 건축물을 다음과 같은 2가지 유형으로 구분하여 풍력실험결과를 정리하여 적용하는 것이 바람직하다.

- 1) 실험대상이 강제건축물인 경우(개략적으로 건축물의 고유진동수가 1 Hz 이상일 때)

구조특성이 명확하지 않은 시점이라도 건축물의 형상이 정해지면 실험을 수행하여 건축물에 작용하는 풍하중을 산정하도록 한다. 이 경우 풍하중을 산정할 때 필요한 풍력실험결과는 평균풍력계수 C_M, C_F , 변동풍력계수 C_M', C_F' , 피크팩터 g_x 이다.

건축물의 높이 z 에서의 평균풍하중의 연직분포 $\overline{W}(z)$ 는 풍력계수를 이용하여 다음 식으로 구할 수 있다.

$$\overline{W}(z) = C \left(\frac{z}{H} \right)^\beta q_H B \quad (1)$$

단, $C = (C_F \cdot C_M) / (C_F - C_M)$,

$$\beta = (2C_M - C_F) / (C_F - C_M)$$

2) 실험대상이 유연건축물인 경우(개략적으로 건축물의 고유진동수가 1Hz 이하일 때)

건축물의 형상 및 구조 특성이 결정된 후에 실험을 수행하여 건축물의 동적 특성 및 건축물의 동적 응답변위가 고려된 풍하중을 산정하도록 한다. 풍하중은 스펙트럼모드해석법에 의하여 변동변위의 표준편차 σ_x 를 구한 후 이를 이용하여 평가한다. 이 경우 풍하중을 산정할 때 필요한 건축물의 동적 특성은 고유진동수 n_1 , 일반화질량 M_1 , 감쇠정수 ζ_1 이고, 필요한 풍력실험결과는 평균풍력계수 C_M, C_F , 변동풍력계수 C_M', C_F' , 전도모멘트의 표준편차 $\sigma_M (= C_M' q_H B H^2)$, 변동풍력의 파워스펙트럼 $S_M(n_1)$, 피크팩터 g_x 이다.

건축물의 진동모드가 z/H 인 선형모드로 움직인다고 가정하면, 변위의 평균값 \bar{X} 은 다음 식으로 주어진다.

$$\bar{X} = \frac{\bar{M}}{(2\pi n_1)^2 M_1 H} \quad (2)$$

단, \bar{M} 는 평균전도모우멘트(= $C_M q_H B H^2$) 이다.

변동변위의 표준편차는 스펙트럼모드해석법에 의하여 다음 식으로 구할 수 있다.

$$\sigma_x = \frac{\sigma_M}{(2\pi n_1)^2 M_1 H} \left(1 + \frac{\pi}{4\zeta_1} \frac{n_1 S_M(n_1)}{\sigma_M^2} \right)^{1/2} \quad (3)$$

따라서, 건축물 최상층에서의 최대응답변위는 평균변위와 변동변위의 합이므로 다음 식과 같이 주어진다.

$$X_{\max} = \bar{X} + g_x \cdot \sigma_x \quad (4)$$

한편, 건물 각층에 발생하는 변동변위의 최대값 $w_{\max}(z)$ 은 다음 식과 같이 된다.

$$x_{\max}(z) = g_x \cdot \sigma_x(z) = g_x \cdot \sigma_x(H) \left(\frac{z}{H} \right) \quad (5)$$

이 최대변동변위에 의해 층질량이 m_z 인 건물 각층에는 (6)식과 같은 관성력인 최대변동풍하중 $w_{\max}(z)$ 이 발생한다.

$$w_{\max}(z) = m_z (2\pi n_1)^2 x_{\max}(z) \quad (6)$$

따라서, 건축물의 각층에 작용하는 최대풍하중 $W(z)$ 는 (1)식으로 주어지는 평균풍력에 의한 평균풍하중 $\bar{W}(z)$ 와 (6)식으로 주어지는 변동풍력에 의한 최대변동풍하중 $w_{\max}(z)$ 의 합으로서 다음 식과

같이 구해진다.

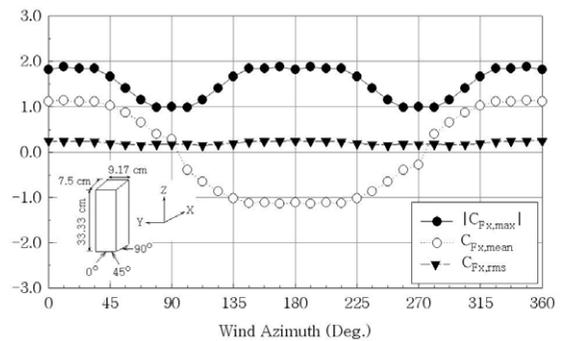
$$W(z) = \bar{W}(z) + w_{\max}(z) \quad (7)$$

한편, 유연건축물에 대한 거주성능의 평가는 변동풍력의 파워스펙트럼 $S_M(n_1)$ 을 이용하여 건축물의 응답가속도를 스펙트럼모드해석법으로 구하여 검토한다. 건물 최상층에서의 응답가속도의 표준편차 σ_a 는 다음 식으로 평가할 수 있다.

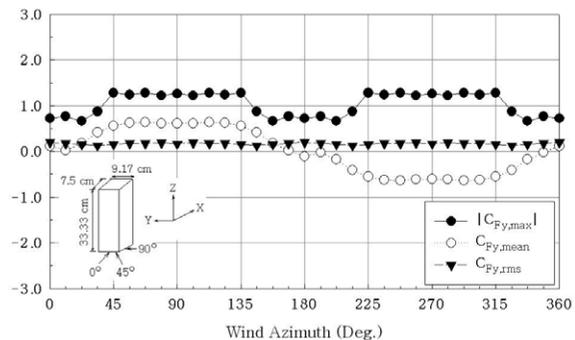
$$\sigma_a = \frac{\sigma_M}{M_1 \cdot H} \left(\frac{\pi}{4\zeta_1} \frac{n_1 S_M(n_1)}{\sigma_M^2} \right)^{1/2} \quad (8)$$

【풍력실험결과의 해석 및 고찰】

〈그림 5〉는 풍력실험 결과 얻어진 풍력계수의 변화를 풍향별로 나타낸 것이다. 최대풍력계수는 1.0~1.8, 평균풍력계수는 -1.2~1.2, 변동풍력계수는 0.25정도를 보인다. 만약, 검토대상의 건축물이 고유진동수 1Hz 이상인 강체건축물이라면 이 결과만으로 위의 3.2.2절 1)에서 기술한 방법에 의하여 풍하중을 산정할 수 있다.



(a) x-방향



(b) y-방향

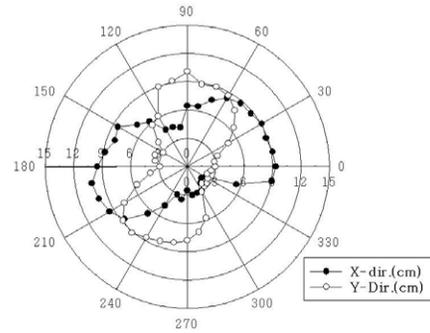
〈그림 5〉 풍향별 풍력계수의 측정 예⁵⁾

〈표 1〉대상건물의 동적 특성값

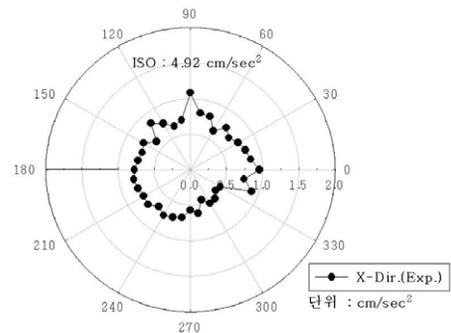
동적 특성값	X방향	Y방향	Z방향
고유진동수 (Hz)	0.21	0.21	0.20
일반화 질량 (kgf · s ² /m)	1.68×10 ⁶	1.74×10 ⁶	-
일반화 질량관성모멘트 (kgf · s ² /m)	-	-	3.07×10 ⁶
감쇠정수	0.02	0.02	0.02

다음 예는 용도가 사무소이고, 주골조는 철근콘크리트조이며, 규모는 높이 127m, 폭 30m, 깊이 30m이며, 동적 특성값은 〈표 1〉과 같은 건물에 대한 풍력실험 결과를 살펴본다. 이 건물 건설지역의 기본 풍속은 100년 재현기대값이 25m/s, 5년 재현기대값이 15m/s이고, 노풍도는 B에 속한다. 대상건물은 현행 풍하중기준에서 규정하고 있는 조건인 「바람에 의한 동적 영향(풍직각방향진동, 비틀림진동)이 예상되는 유연건축물 $H/\sqrt{B \times D} = 127/\sqrt{30 \times 30} = 4.23$ 」에 해당하기 때문에 바람에 대한 건물의 안전성을 설계기준에 의존하기는 어렵고, 풍동실험결과에 의해 설계해야할 규모의 건물이다. 따라서 풍력실험을 실시하여 건물의 동적영향이 반영된 구조골조용 풍하중을 평가하여야 하며, 용도가 사무소이므로 풍진동으로 인한 거주자의 사용성 문제도 고려해야할 사항이다.

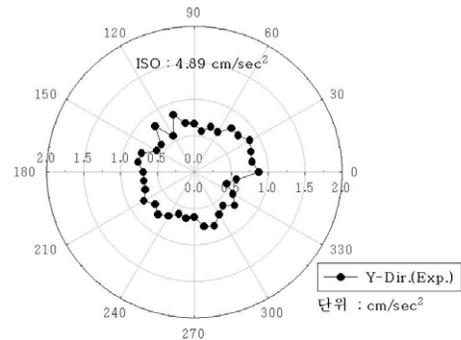
〈그림 6〉은 풍력실험 결과로부터 얻어진 변동풍력의 파워스펙트럼을 이용하여 건축물 최상층에서의 최대응답변위를 (4)식에 의하여 풍향별로 평가한 것이다. 변위를 평가하기 위하여 사용한 풍속의 레벨은 재현기간 100년 풍속이다. 그림에서 90도와 270도를 이은 선이 X축이며, 0도와 180도를 이은 선이 Y축에 해당한다. 결과를 보면 X, Y축의 폭과 고유진동수가 같기 때문에 X, Y축 공히 최대응답변위는 10cm 정도를 나타내며, 이는 건물높이의 H/1,242에 해당한다. 특기할 사항은 풍직각방향의 응답변위가 풍방향보다 월등하게 크다는 것이다. 즉, X축인 경우에는 풍직각방향인 0도와 180도, Y축인 경우에는 90도와 270도 부근에서 응답변위가 최대가 되는 것을 명확하게 알 수 있다. 그 이유는 이 건물이 형상비가 가 되는 $H/\sqrt{B \times D} = 127/\sqrt{30 \times 30} = 4.23$ 세장한 유연건축물이므로 풍직각방향의 진동이 탁월해지기 때문에 발생하는 현상이다.



〈그림 6〉 건물 최상층의 풍향별 최대응답변위



(a) X축의 RMS 응답가속도



(b) Y축의 RMS 응답가속도

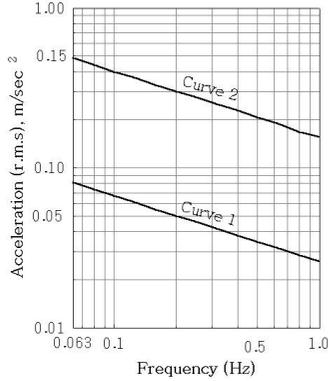
〈그림 7〉 건물 최상층의 RMS응답가속도

〈그림 7〉은 건물 최상층에서의 RMS가속도를 (8) 식에 의하여 평가한 것이다. 가속도를 평가하기 위하여 사용한 풍속의 레벨은 재현기간 5년 풍속이다. 건물 최상층에서의 RMS응답가속도는 X, Y 방향 각각 1.082 cm/s², 0.874 cm/s² 이고, X축이 최대응답가속도를 나타내는 풍향에서의 X, Y축 합성가속도는 1.27 cm/s²이다. 이 값은 ISO 6897-1984(Ⅱ)에서 거주자의 사용성을 검토하기 위하여 규정하고 있는 5년 재현기대풍속 적용 시 건물의 최상층에서 발생하는 진동가속도의 표준편차에 대한 (9)식과 같이 주어지는 평가식(그림 8)의

Curve 1에 해당함)에 의하여 검토한 값 4.92 cm/s² 보다 작다.

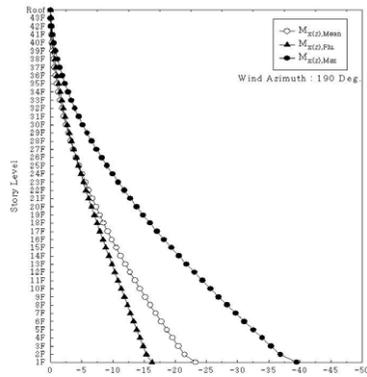
$$\sigma_a = \exp[-0.41 \ln n_1 - 3.65] \quad (9)$$

따라서, 이 건물의 경우 풍진동으로 인한 거주자의 사용성에는 문제가 없다고 볼 수 있다.

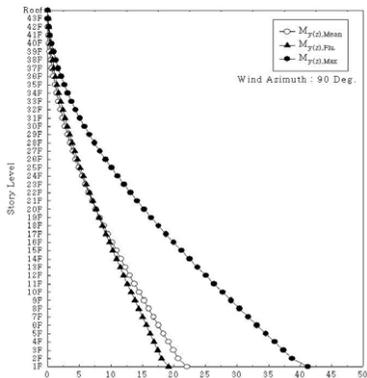


〈그림 8〉 건물 최상층의 수평진동가속도 기준

〈그림 9〉는 (7)식에 근거하여 평가한 건물 각층에 대한 층전도모멘트를 나타낸 것이다. 이 값이 건축물 구조골조 설계의 기본이 되며, 설계자는 이에 근거하여 구조골조를 설계하면 된다.



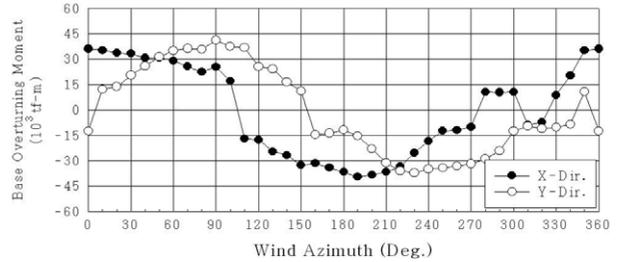
(a) x-방향



(b) y-방향

〈그림 9〉 건물 각층의 최대층전도모멘트

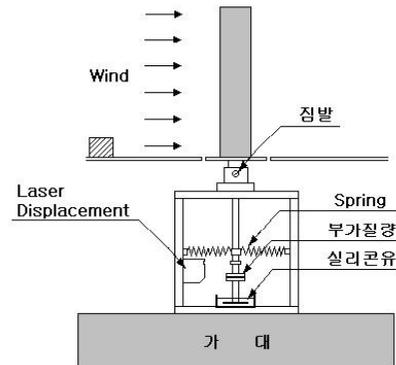
〈그림 10〉은 밀면전도모멘트가 바람이 부는 방향에 따라 어떻게 변화하는지를 나타낸 것이다. 풍향에 따라 밀면전도모멘트는 크게 변하고, X축은 풍향 190도, Y축은 풍향 90도에서 최대값이 발생한다. 따라서 구조골조 설계용 밀면전도모멘트는 풍향 190도와 90도인 경우를 채택하여 사용한다.



〈그림 10〉 풍향별 밀면최대전도모멘트의 변화

3.2.3 공력진동실험(aerodynamic test)

공력진동실험(空力振動實驗)은 세장한 초고층건축물, 기념비, 타워 등과 같이 바람에 의하여 진동하기 쉬운 건축물에 대해 진동에 의하여 발생하는 추가적인 공기력(건축물의 진동이 주변기류에 새로운 운동을 발생시켜 양자의 상호작용에 의해 발생하는 공기력)도 외력으로 고려하여 풍력, 진동특성, 공력안정성을 직접 조사하는 실험이다. 특히, 공력적인 불안정진동이 발생하는가의 여부는 이 실험방법으로 검증하는 경우가 많다.



〈그림 11〉 공력진동측정장치(Gimbal)

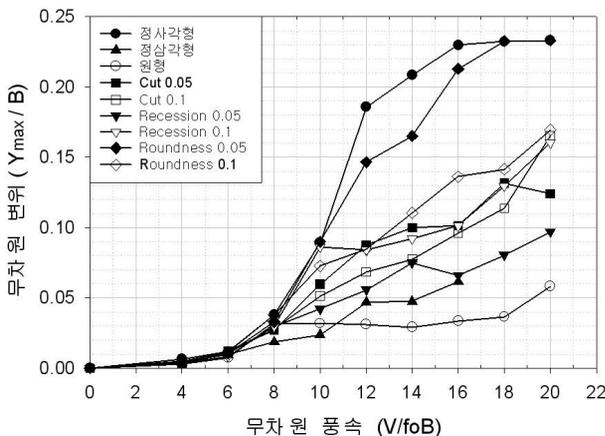
실험은 모형에 진동의 자유도를 부여하는 Gimbal, 강성을 부여하는 Spring, 감쇠를 부여하는 감쇠장치로 구성된 일명 짐발장치(〈그림 11〉 참조)라고 불리는 진동측정장치 위에 모형을 고정시킨 후, 바람에 의하여 발생하는 모형의 거동을 직접 레이저 변위계에 의하여 측정한다. 공력진동실험에 사용되는 모형은 건축물의 동적 특성도 모형화하여 제작하여야 하기 때문에 주의하여야 한다. 또한, 모형의 동적 거동을 직접 측정하기 때문에 풍동이 가동됨으로서 발생하는 진

동이나 기타 외부로부터 발생한 진동이 모형에 전달되지 않도록 집 발장치 하부의 가대는 무겁고 강한 것으로 구성되어야 한다.

공력진동실험 결과에 의거하여 구조골조용 풍하중을 산정할 수도 있으나, 이 방법은 거의 이용하지 않으며, 동적 거동이 극히 중요한 건축물인 경우에 한하여 동적인 거동만을 검토하기 위하여 주로 사용된다.

【공력진동실험 결과의 해석 및 고찰】

〈그림 12〉는 정형적인 단면형상과 그것의 모서리부를 절개시킨 경우 풍직각방향의 응답변위가 어떻게 변화하는지를 공력진동실험에 의하여 비교 분석한 결과를 나타낸 것이다. 이 그림으로부터 정형적인 단면의 모서리부를 절개시키면 풍속이 증가할수록 변위가 크게 줄어드는 것을 명확하게 알 수 있다. 즉, 모서리를 절개시키면 풍직 각방향의 진동을 억제하는데 효과적인 것을 이 실험 결과로부터 알 수 있다. 이처럼 공력진동실험은 건축물의 진동현상을 직접 검토할 때 주로 활용된다.



〈그림 12〉 각종 단면의 풍직각방향 응답곡선⁶⁾

4. 맺음말

건축물의 내풍설계를 위하여 어떤 경우에 풍동실험을 실시하도록 하중기준에서 규정하고 있는지, 왜 풍동실험을 실시해야하는지에 대한 이유, 풍동실험의 종류 및 그 결과의 활용방법에 관해서 개략적으로 기술하였다.

내풍설계의 목적은 강풍 시 구조물의 안정성을 확보하고, 나아가서는 거주자의 사용성까지 확보하는데 있다. 설계자가 풍동실험의 대상이 되는 건축물, 즉 바람의 영향을 받기 쉬운 건축물(초고층건축물, 관광타워, 큰 경간의 지붕, 굴뚝, 대형크레인) 또는 풍력계수를

추정하기 어려운 특수한 형상의 건축물, 국부풍압이 클 것으로 예상되는 복잡한 형상의 건축물, 특수한 외장재를 사용하는 건축물 등을 설계하고자 하는 경우에는 실시설계에 들어가기 전 단계에서 풍전문가와 협의하여 풍동실험을 실시하고, 그 결과를 반영하여 실시설계를 완성하는 것이 가장 합리적이고 경제적으로 내풍설계를 달성할 수 있는 방법이라 할 수 있다.

풍동실험은 건축물에 대한 설계의 신뢰성을 높일 뿐만 아니라, 대부분의 경우 외장재 및 구조골조의 경제적인 설계를 가능하게 하는 유효한 수단이 될 것이다.

참고문헌

1. 기상청, 기상년보, 1951년~1994년
2. American National Standard, Institute(ANSI), Minimum design loads for buildings and other structures, 7-95, 1995
3. ISO 4354-1997(E), ISO 6897-1984(E)
4. 대한건축학회, 건설교통부 제정 건축물 하중기준 및 해설, 2000.
5. 하영철, 김동우, 하중기준과 풍동실험에 의해 평가한 건축물의 풍하중에 관한 고찰, 대한건축학회 학술발표논문집, 2002.4.27, pp.195-pp.198
6. 하영철, 김동우, 이정환, 고층 건축물의 모서리 형상 변화에 따른 풍진동 저감효과에 관한연구, 대한건축학회논문집, 대한건축학회, 제17권, 제7호, pp.3-10, 2001
7. 日本建築センター, 實務者のための風洞實驗ガイドブック, 東京, 1994
8. ASCE, Wind tunnel studies of buildings and structures, ASCE manuals and reports on engineering practices No.67, 1999