



## 풍하중에 대한 고층건물의 내풍설계

김 영 문\*

(전북대학교 건축도시공학부)

### 1. 머리말

최근에 이르러 건설 기술의 발달과 고강도 재료의 출현 등으로 철골조 초고층 건물이 세계적으로 많이 건설되고 있는 실정이다. 국내에서도 40층 이상의 사무실이나 호텔 등의 고층 건물이 대도시 중심부에 많이 세워지고 있으며, 도심권에도 주상 복합 건물로서 40층 정도의 철골조 고층 건물이 세워지고 있는 실정이다.

그리고 기존의 철근 콘크리트 벽식 구조의 고층 아파트가 갖는 문제점들(지하 주차장 확보의 어려움, 벽두께 증가, 인력 확보의 어려움, 내진설계 강화 등) 및 택지의 조건 등으로 초고층 철골조 아파트의 건설이 시도되고 있다. 이러한 철골조 고층 아파트의 경우 강재가 갖는 고강도의 우수성과 연성(ductility)으로 인해 내진 구조적인 면에서 우수할 뿐만 아니라 공사 기간을 단축할 수 있고, 철근 콘크리트 구조 형식에 비해 경량이므로 기초 건설 경비를 절감할 수 있는 장점이 있으나, 풍하중과 같은 횡하중에 대해서는 동적으로 매우 불리한 진동으로 인한 수평 변위와 가속도 응답이 크게 발생할 수 있는 단점이 있다. 특히 40층 정도 높이의 초고층 건물에서는 지진 하중에 의한 응답 효과보다는 풍하중에 의한 응답 효과가 더 커질 수 있다는 사실은 이미 잘 알려져 있다. 이러한 변동 풍하중에 의해 생기는 철골조 초고층 건물의 진동 문제는 내풍설계시 그 중요성과 심각성이 인식되어 내풍공학(wind-engineering)의 주요 과제로서 선진 여러 나라에서는 약 1960년대부터 연구해 오고 있는 실정이다<sup>(1-4)</sup>.

고층건물이 세워지는 범위인 지상에서 600 m 높이 범위의 대기 경계층(atmospheric boundary layer)에서 부는 바람에는 지표면 조도(surface roughness)의 영향으로, 난류(turbulent)성분의 변동 풍속(fluctuating velocity)성분을 동반하기 때문에, 이로 인해 구조물에 진동을 일으키게 된다. 이러한 돌풍 성분을 포함한 풍하중은 구조물의 고유 진동수, 모드형태나 감쇠 효과, 질량, 강성, 세장비 등의 동적(動的) 특성에 따라 구조물에 불리한 진동을 일으키게 한다. 특히 건물의 형태가 매우 세장하거나 단위 질량이 감소되고 감쇠비가 적어, 동적으로 매우 불리한 철골조 초고층 건물의 경우에는 변동 풍속 성분에 의한 동적 응답 효과(변위 및 가속도 응답)가 매우 크게 된다<sup>(5)</sup>.

그런데 고층 건물의 내풍설계시 국내에서 사용하는 2000년에 제정된 풍하중 규준에서는 네 가지 형태의 노풍도(A, B, C, D로 분류)와 높이 변화에 따라 변하는 똑같은 풍압력을 사용하도록 규정하고 있으며, 설계 풍속(design wind speed)의 결정에 있어서도 100년 재현 기대치를 기준으로 한 풍속을 사용하고 있어서, 철골조 초고층 건물과 같이 풍하중의 영향이 큰 경우는 커다란 경제적 손실뿐만 아니라 불합리한 내풍설계가 될 수도 있다고 생각한다.

그리고 철골조 초고층 건물의 경우, 풍하중에 의한 수평 방향의 횡변위(lateral drift)만을 어느 일정한 범위 이내로 들도록 제한하고 있는 일반적인 현행의 구조설계 방법에 의한 안전성의 검토만으로는 거주자에게 만족을 주는 합당한 설계 기준이 되지 못한다는 사실이 인

\* E-mail : kym@chonbuk.ac.kr / Tel : (063) 270-2284

식되고 있는 실정이다. 즉 내풍설계시 최상층의 수평 변위(draft)를 안전한 범위 내에 들도록 안전하게 구조 설계를 했을지라도 상층의 거주자들이 느끼는 불쾌감이나 현기증, 두통 등의 이른바 사용성의 안전상태(serviceability safety)에 문제가 생기게 되는데, 이러한 문제들의 주요원인이 풍하중의 동적 성분에 의한 건물의 가속도 응답이라는 사실이 알려지면서<sup>6)</sup>, 가속도 응답의 필요성이 강조되고 있으며 설계과정에서 이러한 문제를 고려하도록 제한하고 있는 실정이다. 즉 1970년대에 들어서면서 Chen, Hansen, Reed 등은 풍하중에 의해 생기는 진동에 대한 사용성을 확보하기 위해서는 건물의 횡방향 변위를 제한하는 대신에 건물의 동적 응답으로서 가속도를 일정한 값 이하로 유지시키는 방법을 제안하였으며, 1988년 미국 토목학회 철골건물 횡방향 변위 조정위원회(ASCE task committee on drift control of steel building structures)에서도 횡방향 변위에 대한 제한만으로는 건물의 거주자들을 충분히 만족시킬 수 없으므로 풍하중에 의한 건물의 가속도 응답을 기준으로 해서 건물의 가속도 응답이 허용치 이하로 되도록 제한하고 있다<sup>12)</sup>.

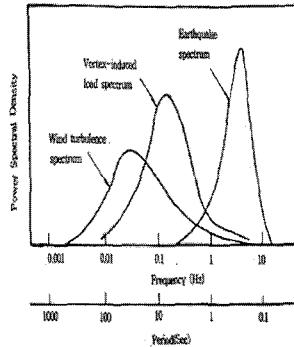
따라서 미국 등 선진 여러 나라에서는 고층건물의 합리적인 내풍설계를 위해서 동적 응답 효과를 실제의 내풍설계에 반영하도록 하고 있으며, 일정 기준 이상의 초고층 건물에 대해서는 풍동실험을 하도록 권장하고 있는 실정이다. 그러므로 구조 설계자는 기본계획단계에서부터 이러한 변동 풍하중에 의한 動的인 응답 효과를 고려한 합리적인 내풍설계를 하는 것이 필요하다.

## 2. 풍하중에 의한 고층건물의 진동 응답해석

일반적으로 동적인 하중을 받는 구조물의 응답에 있어서는 그 구조물의 동적 특성에 크게 의존하게 된다. 그리고 동적인 하중 특성 역시 동적응답에 미치는 영향이 크게 된다. 그러므로 풍하중과 같은 동적인 하중의 영향이 고층 건물인 경우에는 먼저 동적응답특성을 잘 파악해서 그러한 응답에 대해 안전하고 효과적이며 경제적인 구조시스템으로 설계하도록 하는 것이 구조물의 동적인 응답에 대해 바람직한 방법이다.

예를 들면, 지진하중과 풍하중의 동적 특성을 비교해 보면 다음 그림 1에 나타난 바와 같이 진동수 성분에 따

● 변동 풍하중의 스펙트럼 특성



● 불규칙 진동이론(random vibration theory)

$$S_x(n) = |H(n)|^2 S_f(n)$$

$$\sigma_x^2 = \int_0^{\infty} S_x(n) dn$$

$$X_{max} = \bar{X} + g_j \sigma_x$$

$$\text{여기서, } g_j = 2 \ln \ln T + \frac{0.577}{\sqrt{2 \ln \ln T}}$$

$$v_j = \frac{\int_0^{\infty} n^2 S_x(n) dn}{\int_0^{\infty} S_x(n) dn}$$

● Gust factor G<sub>j</sub>

$$G_j = \frac{X_{max}}{\bar{X}} = \frac{\bar{X} + g_j \sigma_x}{\bar{X}} = 1 + g_j \frac{\sigma_x}{\bar{X}}$$

그림 1 지진하중과 풍하중의 스펙트럼 특성

라서 서로 다른 특성을 나타내고 있다.

그림 1에서 알 수 있듯이, 풍하중의 경우는 1 Hz보다 훨씬 적은 진동수 영역에서 스펙트럼 값이 증가되고 있는 반면에 지진하중의 경우는 오히려 감소되고 있음을 알 수 있다.

그런데 풍하중에 의해 고층건물에 진동이 발생하는 경우, 풍방향(alongwind direction, 평균풍속방향으로 평균류 방향이라고도 함) 진동은 접근류에 포함된 낮은 주파수 성분을 갖는 변동 풍속성분에 의한 변동 풍압이 주요 원인이므로, 풍동실험에 기초한 어느정도의 이론적인 접근방법이 가능하다. 그런데 횡방향(acrosswind direction, 풍직각 방향이라고도 함) 진동의 경우는, 변동 풍속성분을 포함한 접근류가 건물의 풍상면에 부딪히면서 각진 모서리 부분에서 박리한 후 측면으로 흘러가면서 양측면에 박리영역과 더불어 박리전단층류(separated shear-layer flow)를 형성해서 재부착(reattachment)을 하기도 하면서 방출된 와(vortex-shedding)와 더불어 후류에 의한 불규칙적인 풍압변동이 횡방향 진동의 주요 원인 되고 있다는 사실이 알려지면서, 이론적인 접근방법보다는 주로 경계층 풍동실험에 의존하게 되었다. 비틀림 방향(torsional direction)의 진동발생 원인은 건물 표면에 작용하는 비대칭적으로 분포하는 순간적인 변동풍압력이나 방출된 와 그리고 후류영역에서의 변동풍압 뿐만 아니라 건물평면이 비대칭적이거나

평면의 기하학적 중심(geometric center)과 질량중심 그리고 강심(center of rigidity)등이 서로 일치하지 않아서 생기는 편심 등이라는 사실이 알려지게 되면서 주로 경계층 풍동실험에 의존하게 되었다.

## 2.1 풍방향 진동응답

앞에서 언급한 바와 같이 풍방향의 변동풍하중은 주로 접근류에 있는 변동풍속성분에 의한 변동풍압에 의해 주로 정해지므로 다음과 같은 두 가지의 가정에 근거해서 구하고 있다.

### (1) 띠이론(the strip theory)의 가정

구조물에 작용하는 풍압력은 풍압력이 작용하는 위치에서의 풍속에 의해서만 결정된다.

### (2) 준정적 이론(the quasi-steady theory)의 가정

변동풍압은 접근류의 변동풍속에 비례한다.

이 두가지 가정 등에 따라서 풍방향 변동풍속  $u(t)$ 로부터 변동풍압  $p(t)$ 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$p(t) = C_p \rho \bar{U} u(t) \quad (1)$$

그리고, 변동 풍하중  $f(t)$ 와 평균 풍하중  $F_D$ 는 다음 식 (2)로 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} f(t) &= \rho C_D U u(t) A \\ \bar{F}_D &= \frac{1}{2} \rho C_D \bar{U}^2 A \end{aligned} \quad (2)$$

그런데 변동 풍하중의 경우 풍하중 자신이 불규칙적인 특성이 있으므로 이러한 변동 풍하중에 의한 구조물의 응답 역시 불규칙적으로 되므로 불규칙 진동 이론(random vibration theory)에 근거해서 구하게 된다. 변동 풍하중을 받는 구조물의 동적응답해석을 위해서는 일반적으로 변동 풍하중을 정상확률과정(stationary random process)의 불규칙 하중으로 가정하고 동적응답 해석을 하게 된다. 정상확률과정의 불규칙하중  $F(t)$ 를 받는 정상상태의 동적응답을 대표하는  $X(t)$ 라고 하면, 이러한 응답을 구하는 문제 역시 정상확률과정으로서 다루게 된다. 가진력  $F(t)$ 가 정상확률과정의 불규칙 하중으로  $\int_0^\infty |F(t)| dt$ 가 존재하며 유한한 값을 갖는다면, 알고 있는 진동수 응답 함수  $H(n)$ 와 불규칙 하중과 응답 변위의 파워 스펙트럼 함수  $S_F(n)$ 와  $S_X(n)$ 를 이

용해서 다음 (3)식의 관계로부터 분산  $\sigma_x^2$ 을 구한 후, 이로부터 원하는 통계적인 해석을 하는 소위 스펙트럼 해석법(spectrum method)을 불규칙 진동이론에서 주로 사용된다.

$$\sigma_x^2 = \int_0^\infty S_X(n) dn \quad (3)$$

$$\text{여기서, } S_X(n) = \int_0^\infty |H(n)| S_F(n)$$

그리고 분포 질량을 갖는 탄성체인 연속체의 모델링 해석에서는 일반적으로 진동 진폭은 무수하게 많은 고유 진동수와 그에 따른 진동 모드의 합성으로 이루어진다. 이러한 고유 진동수와 진동 모드는 작용하는 외력과는 상관이 없으며, 구조물이 갖고 있는 고유한 특성으로서 구조물의 강성과 질량에 따라서 결정된다. 그런데 고층건물과 같은 구조물의 임의의 위치에서 변위는 몇 개의 진동 모드의 합성만으로도 쉽게 구할 수 있게 된다. 만일 구조물의  $i$  번째의 진동 모드를  $\Phi_i(z)$ 라고 한다면 임의의 높이  $z$ 에서의 변위  $x(z, t)$ 는 다음 식 (4)와 같이 나타낼 수 있게 된다. 그러므로 풍하중을 받는 고층건물의 임의의 높이  $z$ 인점 전체 변위  $X(z, t)$ 는 다음과 같이 일반화좌표계(generalized coordinate)를 이용해서 나타낼 수 있게 된다.

$$\begin{aligned} X(z, t) &= \sum \Phi_j(z) X_j(t) \\ &= \overline{X(z, t)} + x(z, t) \\ &= \sum_{j=1} \Phi_j(z) \bar{X}_j(t) + \sum_{j=1} \Phi_j(z) x_j(t) \end{aligned} \quad (4)$$

여기서  $\Phi_j(z) = j$  차 진동모드

$X_j(t) = j$  차 진동모드에 대한 일반화변위

$\bar{X}_j(t) = j$  차 진동모드에 대한 일반화평균변위

$x_j(t) = j$  차 진동모드에 대한 일반화변동변위

식 (4)에서 알 수 있듯이  $j$  차 진동모드  $\Phi_j(z)$ 를 알 수 있다면, 일반화 평균변위  $\bar{X}_j(t)$ 와  $j$  차 일반화 변동변위  $x_j(t)$ 를 알 수 있을 때 건축물의 임의의 위치  $z$ 에 생기는 전체변위  $x(z, t)$ 를 알 수 있게 된다.

이와 같이 일반화 좌표계로서 풍하중에 의한 고층 건물의 변위응답을 구할 때는 일반화 평균변위로 나타나는 정적인 변위(static displacement)성분과 일반화 변동변위

위로 나타내는 동적인 변위(dynamic displacement) 즉 진동변위 성분으로 각각 나누어서 구한 후 더해지게 된다.

식 (4)에서 우선 일반화 평균 변위는, 일반화 좌표계 상에서 평균 풍하중으로부터 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\bar{X}_j(t) = \frac{1}{K_j} \int_0^H \int_0^B C_F \frac{1}{2} \rho \bar{U}_H^2 \Phi_j dydz \quad (5)$$

여기서,  $K_j = j$  차 진동모드의 일반화강성

$U_H =$  건물높이  $H$ 에서의 평균풍속

$j$  차 진동모드에 의한 일반화 변동변위는 스펙트럼 해석법에서는, 분산변위(mean square displacement)의 제곱근인 표준편차 즉 r.m.s(root mean square)로 나타내게 된다.

고층건물이 탄성진동하고 있는 경우, 변동풍하중의 파워스펙트럼함수를 알 수 있다면 파워스펙트럼 함수 사이에는 식 (3)과 같이 다음과 같은 관계식이 성립하게 된다.

$$S_{x_j}(n) = |H_j(n)|^2 S_{f_j}(n) \quad (6)$$

여기서,  $S_{x_j}(n) = j$  차 진동모드의 일반화 변동변위의 파워스펙트럼 함수

$S_{f_j}(n) = j$  차 진동모드의 일반화 변동풍하중의 파워스펙트럼 함수

이렇게 해서 구한  $S_{x_j}(n)$ 을 다음 식 (6)과 같이 진동수 영역에 대해서 적분해줌으로써 일반화 변동변위의 분산을 계산해서, r.m.s값을 구한 후, 식 (4)의 관계로부터 임의의 위치  $z$ 에서의 변동변위  $x(z, t)$ 를 구할 수 있게 된다.

$$\sigma_{x_j}^2 = \int_0^\infty S_{x_j}(n) dn \quad (7)$$

그런데 식 (5)에서  $S_{f_j}(n)$ 은 식 (2)의 관계로부터 다음 식 (8)과 같이 변동풍속의 파워스펙트럼함수  $S_u(n)$ 로부터 구할 수 있다.

$$S_{f_j}(n) = 4 \bar{F}_D^2 \frac{S_u(n)}{U^2} \quad (8)$$

식 (8)의 관계는, 변동풍속이 고층건물의 전 작용면적에 대해서 완전 상관(perfect correlation)을 이루고 있다는 가정하에서 성립하는 것으로서, 이러한 가정은 풍하중을 한 지점에 관한 확률과정(a single-point random process)으로 취급할 때만 가능한데, 이때는 변동풍속성분의 파장(wave length)이 고층건축물의 대표적 길이  $D$ (일반적으로 풍방향과 직각 방향의 길이)보다 매우 큰 저진동수 성분일 때에만 성립한다. 그러므로 크기가 큰 고층건물의 경우, 위에서 언급한 바와 같이 작용하는 변동풍속성분이 모두 완전히 상관관계를 이루지 못하므로 이러한 상관관계를 고려하기 위해서 식 (9)

처럼 aerodynamic admittance 함수  $\left| x^2 \left( \frac{nD}{U} \right) \right|$ 을 곱해준다.

$$S_{f_j}(n) = 4 \left| x^2 \left( \frac{nD}{U} \right) \right| \bar{F}_D^2 \frac{S_u(n)}{U^2} \quad (9)$$

즉, 변동풍속성분의 크기가 이 변동풍속이 작용하는 구조물의 크기에 미치는 영향을 나타내는 aerodynamic admittance 함수는 구조물의 형태와 크기 그리고 변동

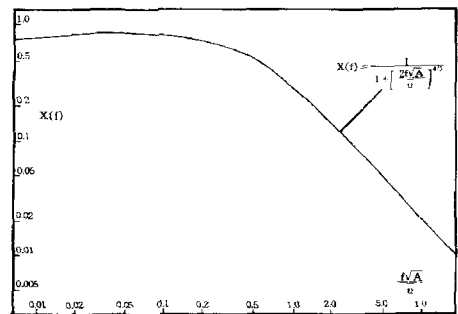


그림 2 Aerodynamic admittance 함수

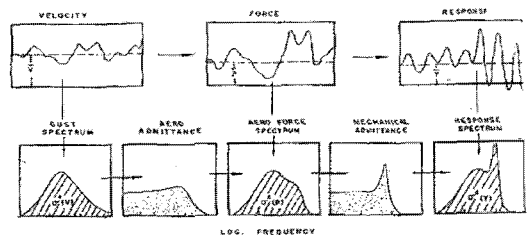


그림 3 변동 풍하중에 대한 응답과정

풍속성분의 함수로 되며, 대표적인 것으로는 A. G. Davenport가 제안한 그림 2에 나타난 함수가 있다<sup>(1,2)</sup>.

그러므로 식 (9)를 식 (3)에 대입해서 변동변위의 r.m.s 값을 구하는 과정을 그림 3에 나타내고 있다.

## 2.2 풍직각방향 동적응답<sup>(9)</sup>

앞에서도 언급한 바와 같이 풍하중에 의한 고층 건물의 진동은, 접근류 속에 포함된 난류성분뿐만 아니라, 측면에서 발생하는 바리전단층류와 방출된 와류 그리고 풍하층의 후류에 의해 발생하게 된다.

일반적으로 물체에 바람이 부딪히게 되면, 물체로부터 흐름이 바리해서 물체의 와류가 발생하게 된다. 특히 정방형 단면을 갖는 물체는 그림 4에서와 같이 와가 교대로 물체로부터 방출되어 두 개의 규칙적인 와열을 형성하는 수가 있는데, 이러한 와열을 Karman 와열(Karman vortex)이라고 한다.

이러한 Karman 와열의 발생은 표면의 압력에 주기적 변동을 생기게 하고 그 결과 물체에는 주기적인 변동력이 작용하게 된다. 이 변동력은 주로 횡방향으로 작용하게 된다.

이때 Karman 와(渦)의 발생 진동수를  $n_s$ , 다시 말하면 주기적인 횡방향 변동력의 진동수인  $n_s$ 와 풍속  $\bar{U}$ , 물체의 대표적인 길이  $D$  사이에는 일정한 관계가 있게 되는데, 이러한 관계는 다음 식 (10)으로 정의하는 Strouhal 수  $S_t$ 로 나타낸다.

$$S_t = \frac{n_s D}{U} \quad (10)$$

여기서 Karman 와열과 유사한 현상, 결국에는 Karman와 열만큼은 정연하지는 않지만, 물체 단면의 양측으로부터 와가 교대로 방출되는 현상은 세장한 구조물이나 구조 부재의 후류에서도 나타나게 된다. 따라서, 세장한 구조물 등에서는 횡방향 진동시의 고유주

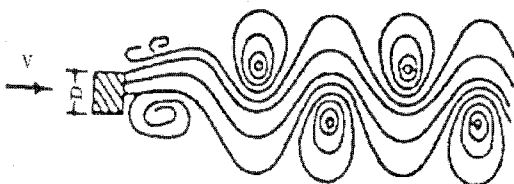


그림 4 물체로부터의 와열의 발생

기  $T$ 와 와류 발생의 주기  $\frac{1}{n_s}$ 가 일치할 때의 풍속을  $U_{cr}$ 이라고하면  $U_{cr}$ 은 다음식 (11)이 된다.

$$U_{cr} = \frac{n_s D}{S_t} \quad (11)$$

이렇게 되면  $U_{cr}$  근방에서 횡방향으로 현저하게 큰 진동이 생기게 되는데 이때의  $U_{cr}$ 을 공진풍속이라고 한다. 그런데, 이와 같은 원인으로 해서 발생하는 횡방향 진동응답은, 풍방향 진동응답에서처럼, 거스트계수와 같은 이론적인 접근방법은 아직 알려지지 않고 있으며, 주로 경계층 풍동실험에 의해 진동응답을 구하게 된다. 그리고, 횡방향 진동응답이 풍방향 진동보다 일반적으로 더 크게 되므로, 고층 건물의 내풍설계시 풍방향 응답보다는 횡방향 응답이 설계한도를 결정하는 주요 요소라는 사실에 주의할 필요가 있다. 그림 5에서는 경계층 풍동실험으로부터 구한 대표적인 각방향별 풍하중 스펙트럼을 나타내고 있다. 그림 6에서는 이들 각 방향의 가속도응답의 크기를 나타내고 있다<sup>(8)</sup>.

## 2.3 고층건물의 가속도 응답

모든 건물은 풍하중에 의해 어떠한 정도일지라도 움직이게 된다. 특히 세장한 고층건물의 경우에는 이러한 건물의 움직임이 커지거나 자주 일어나게 되어서 거주자에

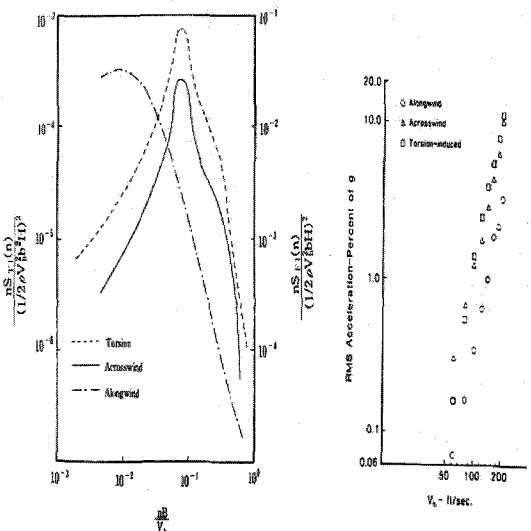


그림 5 풍방향, 횡방향 및 비틀림방향의 풍하중 스펙트럼

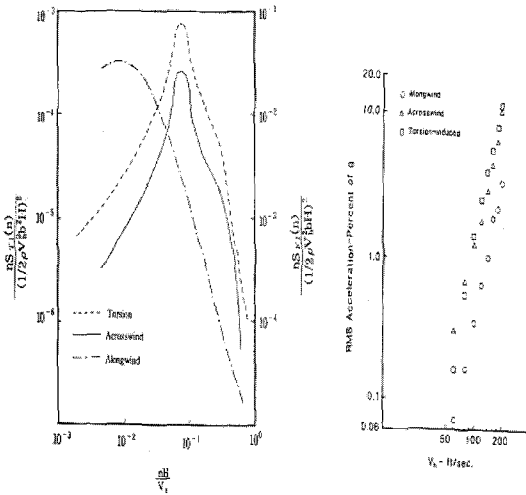


그림 6 풍방향, 횡방향 및 비틀림방향의 가속도 응답

게 심각한 문제를 일으키기도 한다.

고층건물의 풍하중에 의한 이러한 움직임은 일반적으로 수평방향의 가속도 응답의 크기로 평가하게 된다. 이러한 고층건물의 움직임은 실내에 거주하는 거주자가 느끼거나 보게 되는데, 예를 들면 실내조명 및 반사가 흔들리거나, 물이 흔들리거나, 육조에 받아놓은 물의 수면이 흔들리는 모습 등이 있다.

이러한 풍하중에 의한 건물의 움직임이 자주 일어나게 되면 거주자는 배멀미나 현지증 혹은 균형감각이나 작업능력, 그리고 운동신경계 등에 큰 문제를 일으킬 수 있다.

그래서 ASCE 와 CTBUH(the council on tall building and urban habitat)의 활동에 힘입어 고층건물의 풍하중

표 1 풍하중에 의한 고층건물의 허용 가속도 응답범위

	허용 가속도 응답 속도	
	1년간 재현기간 풍속에 대해서	10년 재현기간 풍속에 대해서
최상층에서의 최대전체 가속도 응답(단위 : milli g)		
거주용	5 ~ 7	10 ~ 15
호텔	7 ~ 9	15 ~ 20
사무실	9 ~ 12	20 ~ 25
최상층에서 비틀림속도 (milli rad/sec)	1.5	3.0

에 의한 허용 가속도 응답 범위는 표 1과 같이 제안하고 있다.

### 3. 내풍설계

건축물의 내풍설계의 목적은 건축물의 수명기간 동안에 한 번 또는 있을지 없을지 모르는 드문 강풍에 대하여 적절한 안전성을 확보하고, 발생할 수 있는 강풍에 대하여 적절한 사용성·거주성을 확보할 수 있도록 구조골조 및 외장재를 안전하게 설계하는 것이다.

내풍설계의 목적을 달성하기 위해서는 우선 설계 기준(design criteria)을 정하지 않으면 안 된다. 설계의 기준이 정해지면 우선, 건설장소 주위에 부는 바람의 성질에 대한 정보가 필요하다. 내용은 강풍의 발생빈도, 지표면 조도 변화에 따른 평균풍속의 연직분포, 난류의 강도 등이 있다. 그리고 내풍설계 대상 건물에 대한 재현기간(return period)을 고려한 설계풍속(design wind speed)을 결정하게 되는데, 이는 경도풍 풍속이나 기준 등에 있는 기본풍속(basic wind speed)을 이용하기도 한다.

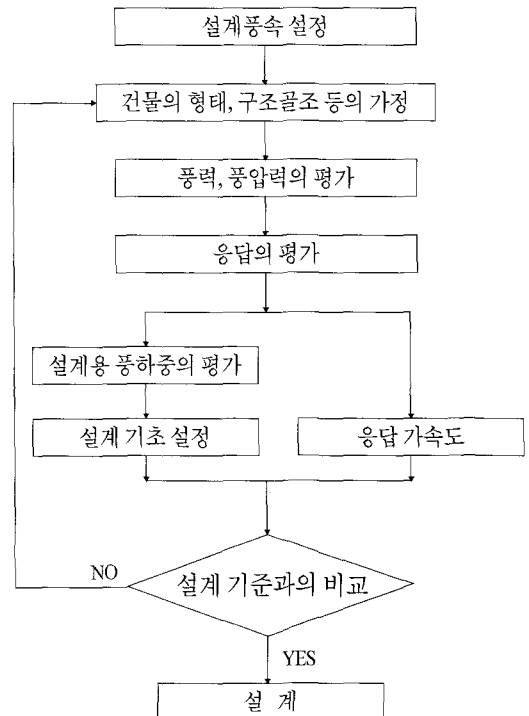



그림 7 내풍설계의 흐름도

그 다음에는 이러한 설계풍속에 근거해서 우선 평균 풍압력이나 평균풍력을 구하게 된다. 이 때 보통 풍력 계수나 풍압계수는 풍하중 기준등에 나타나 있는 값들을 이용하기도 하지만, 풍동실험에서 얻은 계수값을 이용하는 것이 바람직하다.

그런데 구조물의 설계에서는 풍력 그 자체의 크기로 결정하는 것이 아니고 풍력에 의해 생긴 구조물의 응답 요소인 변위, 변형각, 가속도, 휨모멘트, 전단력 등에 의해 결정한다. 이러한 풍력에 의해 생기는 응답을 총괄해서, 하중효과라고 부르고, 보통은 최대하중효과가 설계의 대상으로 된다.

풍력은 근본적으로 동적으로 작용하는 하중이므로, 하중효과도 동적으로 고려하지 않으면 안되고, 최대하중효과도 동적응답의 결과로서 평가된다. 설계에서는 보통, 최대하중효과와 동일한 하중효과를 갖도록 등가인 정적인 풍하중이 이용된다.

이상의 내풍설계 과정을 간단히 흐름도(flow chart)를 이용해서 나타내면 그림 7과 같이 된다. 

### 참고문헌

- (1) Davenport, A. G., 1967, "Gust Loading Factor", ASCE, ST3.
- (2) Davenport, A. G., 1962, "The Response of Slender Line-like Structure to a Gusty Wind", Institution of Civil Engineering paper, No.6610.
- (3) Davenport, A. G., 1961, "The Application of Statistical concepts to the Wind Loading of Structures", Institution of Civil Engineering paper, No.6480.
- (4) Davenport, A. G., 1963, "Note on the Distribution of the Largest Value of a Random Function with Application to Gust Loading", Institution of Civil Engineering Paper, No.6739.
- (5) Davenport, A. G., 1997, "The Prediction of the Response of Structures to Gusty Wind", International Seminar on Safety of Structures under Dynamic Loading held in June 1977 at the Norwegian Institution of Technology.
- (6) Kareem, A., 1987, "Wind Effect on Structures : a Probabilistic viewpoint", Probabilistic Engineering Mechanics, Vol. 2, No. 4.
- (7) Kareem, A., 1982, "Fluctuation Wind Load on Buildings", ASCE, EM6, PP. 1086~1102.
- (8) Kareem, A., 1985, "Lateral-Torsional Motion of Tall Buildings to Wind Loads", Journal of Structural Engineering, Vol. 111, No. 11, pp.2479~2496.
- (9) Kareem, A., 1982, "Acrosswind Response of Buildings", ASCE, Vol.108, ST4.
- (10) Nick Isyumov & John Kilpatrick, 1996, "Full-scale Experience with Wind-Induced Motions of Tall Buildings, Tall building Structures-A World View, Council on Tall Buildings and Urban Habitat.
- (11) Simiu, E., "Wind Effect on Structure", 2nd Ed., John Wiley & Sons.
- (12) ASCE Task Committee on Drift Control of Steel Building Structures of the Committee on Design of Steel Building Structures, 1988, "Wind Drift Design of Steel-framed Buildings : State-of-the-art Report", Jour. of St. Eng., Vol. 114, No.9.
- (12) 김영문 역, 1998, "실무자를 위한 건축물 풍동실험 가이드북", 한국풍공학회.
- (13) 김영문, 1997, "고층건물의 풍하중에 의한 풍동실험(진동실험)방법", 한국풍공학회지, 제1권, 제1호.
- (14) 김영문의 2인 역, 2002, "건축물의 내풍설계", 한림원.