

철근콘크리트 고층 건축물의 해석 및 설계

초고층 건물의 풍동실험 및 내풍해석

Dynamic Analysis and Wind Tunnel Tests of
Highrise Buildings Under Wind Action



김진구*

1. 머리말

최근 동아시아 국가들을 중심으로 많은 고층건물들이 건설되고 있으며 국내에서도 초고층건물에 대한 관심이 점차 높아지고 있다. 건물이 고층화 할수록 건물에 미치는 바람의 영향은 기하급수적으로 증가하게 되며 구조적인 문제 뿐 아니라 외장, 거주성, 주변환경 등에 미치는 영향이 크므로 계획단계에서부터 중요한 요소로 고려되어야 한다.

현대의 고층건물은 고강도재료의 사용으로 건물의 뼈대가 세장되어지고 외벽 및 내부 칸막이벽에 경량한 자재가 사용되어 강성과 중량, 감쇠능력이 감소함에 따라 바람에 대하여 점차 취약해지는 경향이 있다. 바람에 의해 고층건물에 발생할 수 있는 문제로는 진도모멘트에 의한 안정성 문제를 비롯하여 흔들림에 의해 거주자들이 느낄 수 있는 불쾌감, 접합부의 피로현상, 외부 커튼월과 내부 칸막이벽의 균열, 소음의 발생, 건물과 엘리베이터의 공진,

주변건물과 보행자에 대한 부정적영향 등을 들 수 있다.

본 기사에서는 풍하중을 구성하는 요소들의 특징과 모델링 등에 대하여 기술하고 풍동실험 및 해석 방법에 대하여 알아보기로 한다.

2. 풍하중의 특성

바람은 계절에 따라 변화가 심하며 시간별로도 불규칙하게 변하기 때문에 바람의 성질을 단순한 식으로 계량화하기에는 어려운 점이 있지만 해석 및 설계를 위해서 간단한 형태로 단순화시켜 사용한다. 바람이 건물에 미치는 영향은 바람을 일으키는 자연적 요인과 건물이 위치한 지역적 조건, 건물의 형태 등에 따라 매우 복잡한 양상을 보인다.

일반적으로 특정한 시각의 풍속을 평균풍속 \bar{V} 와 변동풍속 \tilde{V} 의 합으로 표시한다. 보통 바람의 주기는 30~60초 정도로 정적하중으로 간주할 수 있으

* 정회원, 삼성물산 건설부문 기술연구소

나 변동성분에 해당하는 gust 또는 turbulence는 그 주기가 고층건물의 고유주기에 근접할 경우가 많아 증폭된 동적응답을 초래할 수 있다.

바람은 지면에 가까워질 수록 지형지물과의 마찰에 의해 그 속도가 감소하게 된다. 이러한 현상은 건물이 밀집한 도심에서 가장 두드러지고 별판이나 해안으로 갈수록 약화되는데 특정한 높이에서의 평균풍속 \bar{V}_j 는 일반적으로 다음과 같은 형태로 표시할 수 있다:

$$\bar{V}_j = \bar{V}_g \left(\frac{z_j}{z_g} \right)^\alpha \quad (2.1)$$

위에서 z_j 는 j 층의 높이, z_g 는 풍속이 지표의 영향을 받지 않는 높이인 기준고도(gradient height), \bar{V}_g 는 기준고도에서의 풍속, α 는 지표의 상태에 따라 0.15에서 0.5 사이의 값을 가지는 상수이다.

바람은 높이에 따라 속도가 변할 뿐 아니라 같은 높이에서도 시간에 따라 속도의 변동이 심하다. 이것은 바람을 구성하는 공기입자의 점성이 매우 작고 지형지물의 영향으로 그 세기 및 진행방향이 쉽게 달라지기 때문으로 추정된다. 이러한 풍속의 변화는 비교적 넓은 범위의 진동수 성분에 분포되어 있으며 그 불규칙성 때문에 통상 통계적인 접근방법이 사용되고 있다. 그림 1은 풍동실험에서 구한 변동풍속 스펙트럼의 한 예이다.

풍하중에 대하여 건물은 바람의 방향(along

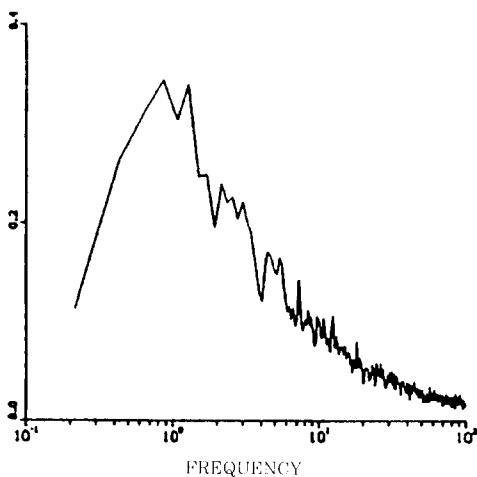


그림 1 풍동실험에 의한 변동풍속의 스펙트럼

wind) 뿐 아니라 그 직각방향(across wind)으로도 반응을 일으키는데 고층건물의 경우 직각방향의 응답이 더욱 중요한 설계 요소가 되는 경우가 많다. 이것은 주로 바람이 건물의 양쪽 측면으로 갈라져 진행방향과 직각으로 작용하는 성분(wake)이 양쪽에서 번갈아가며 건물에 작용하는 현상(vortex shedding) 때문이며 그 주기가 건물의 주기에 가까워질 때 공진현상이 발생할 가능성이 있다. Vortex shedding의 주기는 다음과 같은 간단한 식에 의해 근사적으로 구할 수 있다:

$$f = \frac{\bar{V} S_f}{D} \quad (2.2)$$

여기서 \bar{V} 는 최상층의 평균풍속, S_f 는 풍속과 건물 형태에 따라 달라지는 Strouhal number, D 는 건물의 폭이다. 풍하중과 건물의 특성상 과도한 동적응답이 우려될 경우 이것을 정확하게 예측할 수 있는 해석적 방법은 아직 개발되어 있지 않으며 풍동실험을 통한 검증이 가장 확실하다 할 수 있다.

3. 풍동실험에 의한 건물의 응답 및 설계하중의 산정

19세기 말 Gustave Eiffel이 파리박람회 기념탑을 설계하며 풍하중을 가정하여 적용한 이후 20세기에 들어 항공산업의 급속한 발전과 더불어 구조물에 미치는 바람의 영향에 대한 연구가 활발히 진행되어 왔다. 특히 1940년 미국의 Tacoma Bridge가 바람에 의한 공진현상으로 붕괴됨에 따라 구조물에 작용하는 풍하중의 중요성이 크게 부각되었다. 항공기용 풍동실험은 풍속이 일정한 높은 고도의 상태를 구현하므로 비교적 짧은 풍동속에서 행하여지나 건물의 경우는 높이에 따른 풍속의 변화를 표현하여야 하므로 비교적 긴 터널을 필요로 하며 바닥에 요철을 설치하여 지표에 부는 바람과 유사한 효과를 만든다.

진술한 바와 같이 바람은 매우 불규칙한 특성을 가지고 있으며 gust, vortex shedding 등 정적하중으로 단순화 하거나 간단한 수식으로 모델링하기 어려운 면이 많기 때문에 풍동실험에 의한 검증이 널리 이용되고 있다. 특히 고층건물인 경우 바람에

대한 안정성(최대변위) 및 거주성(최대가속도)에 대한 검증, 국부풍압 및 설계하중의 산정, 보행자 및 주변건물에 대한 영향평가 등에 사용된다. 또한 몇가지 설계대안 중에서 가장 작은 풍하중을 받는 형태를 찾아내기 위해서 이용되기도 한다.

풍동실험에 의하여 산정된 풍하중과 건물의 응답은 규준에 의거한 결과에 비하여 작아지는 경향이 있는데 이것은 먼저 규준에서는 모든 방향에 대하여 가장 불리한 하중상태를 가정하는 반면 풍동실험에서는 그 지역의 기상자료 및 지역조건을 토대로 방향에 따른 풍하중의 크기를 좀더 현실적으로 산정하기 때문이다. 또한 반경 400~500m 이내의 모든 지형지물을 포함한 모델을 이용함으로써 주변 건물들에 의해 풍하중이 감소하는 효과도 고려될 수 있다.

풍동실험에는 바람의 크기 및 방향성, 높이에 따른 풍속의 변화 등 하중의 모델링과 관련된 가정이 포함되고 건물과 주변모형의 제작에 있어서도 불확실성을 내포하고 있으나 결과의 신빙성에 대하여 쉽게 확인할 수 있는 방법은 개발되어 있지 않다. 하지만 건물이 완성된 후 건물에서 실측한 데이터와 풍동실험 결과를 비교함으로써 그 정확성을 확인할 수 있다. 그림 2는 1993년 태풍 Alicia가 미국에 상륙했을 때 Huston의 Allied Bank Plaza 71층에서 측정된 최대가속도와 모델을 이용한 풍동실험결과를 비교한 것이며 건물에서 실측한 결과는 실험결과와 잘 부합하는 것을 알 수 있다.

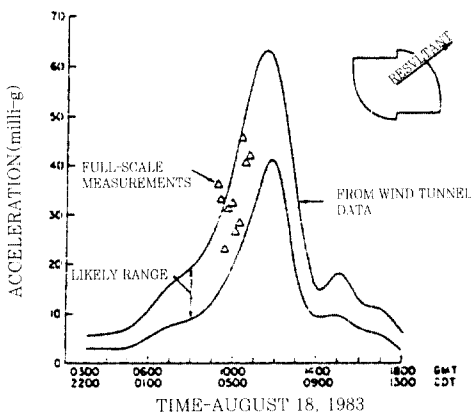
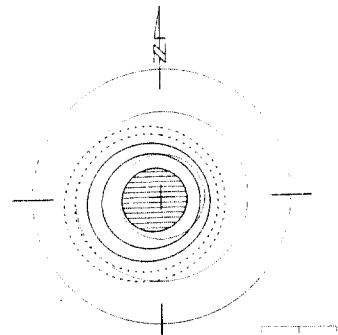


그림 2 풍동실험에 의한 건물의 가속도와 실측결과의 비교

풍동실험에서는 실험에 가장 적당한 임의의 풍속이 이용되므로 특정한 방향으로 어떤 크기의 바람이 어떤 주기로 불어올 것인가에 대한 정보를 포함하지 않아 그 결과 자체는 큰 의미가 없다. 따라서 풍동실험에서는 기상청자료등 과거 그 지역의 바람의 상황에 대한 데이터를 토대로 모든 방향의 풍속을 확률적으로 표현한 풍모델이 필요하다. 그림 3은 서울 지역의 방향에 따른 풍속의 분포를 나타내는데 원의 크기는 각 발생주기(return period)에 따른 바람의 세기를 나타내며 원이 클 수록 그 발생 확률은 작아진다. 이 그림에서 서울지역은 남서쪽에서 불어오는 바람의 세기가 가장 큰 것을 알 수 있다. 풍동실험은 그 목적 또는 방법에 따라 크게 pressure test, force balance test, aeroelastic test의 세가지로 나눌 수 있으며 그림 4는 각 실험 모델의 예이다.



Radial Distances indicate wind Speed in MPS
A Point Along the Innermost Contour Represents the wind Speed Exceeded on Average 1% of the Time Within a 22.5 Degree Sector Centred on that Direction. Other Contours Represent Probability Levels of 1%, .01%, .001% and .0001%, Respectively

그림 3 서울지역 풍속의 확률적 분포모델

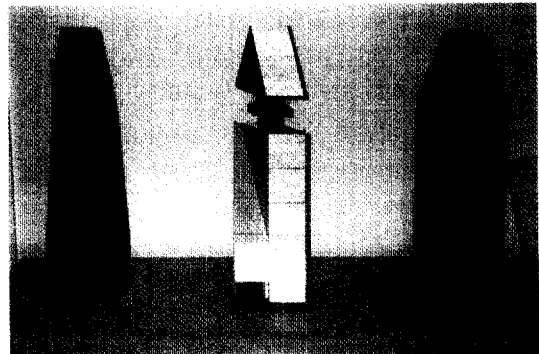


그림 4 풍동실험용 건물모델 : 왼쪽에서부터 pressure model, aeroelastic model, force balance model

3.1 국부풍압의 산정 (Pressure test)

건물의 표면에 작용하는 국부풍압을 고려하기 위하여 규준에 건물의 부위에 따른 국부풍압에 대하여 규정하고 있지만 최근 고층건물의 형태가 매우 다양하고 복잡해짐에 따라 풍동실험을 통하여 풍압의 분포를 예측하는 것이 일반화되어 있다.

사각형 평면을 갖는 건물인 경우 바람에 대하여 압축력을 받는 면(region 1)과 인발력(suction)을 받는 면(region 2,3)으로 구분할 수 있다(그림 5). 건물의 표면에 작용하는 풍압은 위치 및 시간에 따라 변동이 심하며 이러한 현상은 압축력을 받는 면에서 두드러진다. 따라서 유리창이나 커튼월의 설계하중은 평균풍압에 변동성분을 더하여 산정한다. 보통 커튼월의 고유진동수는 5~50 정도로 바람의 변동성분의 진동수보다 매우 크므로 바람을 정적하중으로 간주하여 설계한다. 일반적으로 압축력보다 인발력에 의한 영향이 더 크고 건물의 구석에 큰 풍압이 집중되는 경향이 있다.

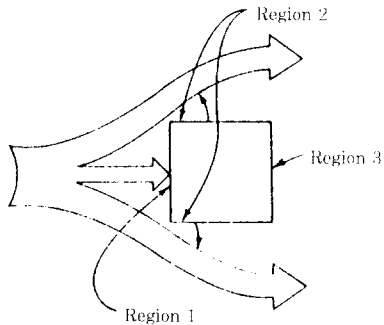


그림 5
풍압을 받는
건물면의
구분

건물의 표면에 작용하는 풍압의 분포와 크기는 rigid 모델에 많은 수의 pressure tab(400~700개)을 부착한 후 풍동실험을 통하여 측정할 수 있다. 각 tab은 비닐튜브를 통하여 transducer에 연결되고 transducer는 측정된 풍압을 전기신호로 바꾸어 컴퓨터의 data acquisition system으로 전송하면 컴퓨터는 평균값과 root mean square를 계산하고 최대, 최소값을 기록한다. 신뢰할 수 있는 결과를 얻기 위해서 약 1분 정도 측정이 이루어지며 바람의 각도를 10도 정도씩 증가시켜 가며 360도 모든 방향의 측정이 이루어질 때까지 반복한

다. 불규칙한 바람의 성질과 건물에 의한 영향으로 국부풍압의 변동이 매우 심하며 약 1시간 정도 측정된 최대풍압은 평균값의 7~8배에 달하는 경우도 있어 커튼월의 설계풍압은 변동성분의 RMS(root mean square)값에 peak factor를 곱한 값을 평균풍압에 더하여 산정한다. 그림 6은 풍동실험을 통하여 건물의 표면에서 측정된 국부풍압 분포의 한 예이다.

고층건물의 커튼월은 풍압에 저항할 수 있어야 함은 물론 건물의 과도한 변위에 의한 변형에도 견딜 수 있도록 설계되어야 한다. 실제로 I. M. Pei에 의해 설계된 Boston의 John Hancock Tower Building은 완공 직후부터 많은 수의 유리 커튼월이 깨져 보수하는데 큰 비용이 들었고 결국 TMD를 설치하여 문제를 해결할 수 있었다.

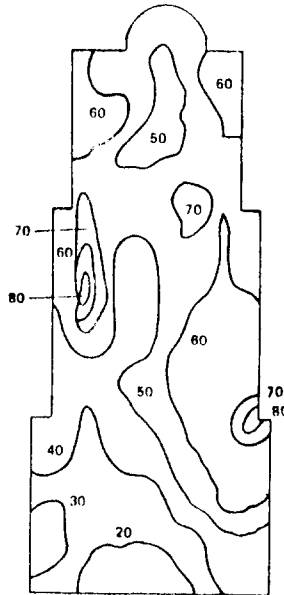


그림 6
건물 표면에
작용하는 국부
풍압의 예

3.2 Force Balance Test

Force balance test는 스티로폼과 같은 가볍고 rigid한 재료로 1/400 내지 1/500로 축소하여 만든 모델을 정밀한 force balance위에 올려놓고 건물의 1차모드에 작용하는 바람의 하중과 건물의 최대변위, 최대사속도 등을 직접 구할 수 있는 방법이다. Rigid한 모델을 사용하므로 1차모드를 직선으

로 가정하게 되며 2차모드 이상의 고차모드에 의한 동적효과 (aerodynamic damping)를 고려할 수 없는 단점이 있지만 고층건물의 거동은 주로 1차모드에 의해 지배되고 1차모드의 형태는 직선에 가깝기 때문에 일반적인 형태의 건물인 경우 고차 모드의 영향을 고려한 aeroelastic test와 비교할 때 유사한 결과를 보인다. Force balance에 장치된 strain gage를 이용하여 시간별 진도모멘트 $M(t)$ 를 구하고 그 평균값 \bar{M} 와 변동성분의 power spectrum $S_M(\omega)$ 를 이용하여 1차모드에 작용하는 풍하중(generalized force)의 평균값 \bar{F} 와 스펙트럼 $S_F(\omega)$ 을 다음과 같이 구한다 :

$$F(t) = \int_0^H p(v, t)\phi(v)dv = \frac{1}{H} \int_0^H p(v, t)vdv = \frac{1}{H} M(t) \quad (3.1)$$

$$\bar{F} = \frac{1}{T} \int_0^T F(t)dt = \frac{1}{H} \bar{M} \quad (3.2)$$

$$S_F(\omega) = \frac{1}{H^2} S_M(\omega) \quad (3.3)$$

여기서 H 는 건물의 높이, $p(v, t)$ 는 지상에서 v 높이에 작용하는 풍하중, $\phi(v)$ 는 모드형상이며 일차모드가 직선이면 $\frac{v}{H}$ 로 가정할 수 있다. 평균 변위 \bar{u} 는 generalized force \bar{F} 와 generalized stiffness k 를 이용하여 구할 수 있다 :

$$\bar{u} = \frac{\bar{F}}{k} = \frac{\bar{F}}{\bar{m}\omega_1^2} \quad (3.4)$$

$$\bar{m} = \int_0^H m(v)\phi(v)dv \quad : \text{generalized mass}$$

또한 변동성분에 의한 변위의 RMS 값은 풍하중의 스펙트럼과 건물의 transfer function $H(\omega_1)$ 으로부터 구해진다 :

$$\sigma_u^2 = \int_0^{\infty} \tilde{S}_u(\omega) d\omega = \int_0^{\infty} \tilde{S}_F(\omega) H(\omega)^2 d\omega \quad (3.5)$$

최대변위 u_{max} 는 :

$$u_{max} = \bar{u} + g\sigma_u \quad (3.6)$$

여기서 g 는 peak factor이다. 가속도는 바람의 변동성분에 의해 발생하므로 변동성분에 의한 변위

에 1차모드 진동수 ω_1 을 곱하여 구할 수 있다.

Force balance test는 scaling factor를 고려할 필요가 없으므로 모델 제작이 간편하고 5~7주만에 실험을 완료할 수 있어 바람에 대한 건물의 응답과 설계하중을 구하기 위해 많이 행하여지고 있다. 그림 7은 풍동실험실의 내부와 force balance test용 축소모델이다.

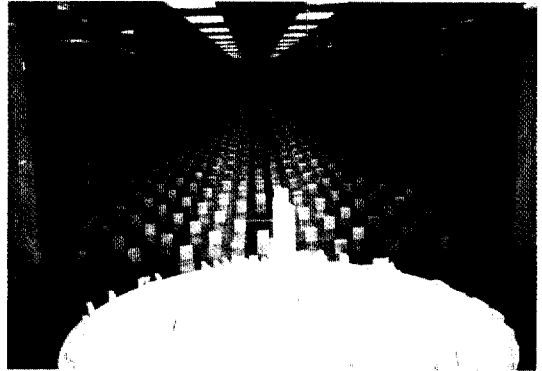


그림 7 풍동실험실 내부와 force balance test용 축소모델

3.3 Aeroelastic test

Aerodynamic damping은 보통의 풍하중에 대해서는 건물에 유리하게 작용하나 풍속이 어느 한도 이상으로 증가하면 불리하게 작용할 수 있으며 이러한 현상은 across wind일 경우 더욱 뚜렷할 수 있다. Aerodynamic damping의 영향은 다자유도 모델을 이용한 aeroelastic test를 통하여 비교적 정확하게 추정할 수 있다. 이 방법은 건물의 연성(flexibility)과 자중의 분포, damping 등을 고려하여 모델을 제작하기 때문에 풍하중에 의한 건물의 동적특성을 좀더 정확하게 표현할 수 있다. 사용되는 모델은 건물의 형태나 특성에 따라 rigid body를 이용한 이른바 'stick' 모델이나 다자유도 모델(multi-degree of freedom model)이 사용된다. Stick 모델은 바람에 의한 건물의 응답이 1차모드와 관련된 횡방향과 비틀림에 의해 좌우되고 1차모드는 직선에 가까운 현상에 근거를 두며 모델의 질량, 주기 및 댐핑값을 쉽게 바꿀 수 있는 장점이 있다. 건물의 형태나 구조시스템의 영향으로 두개의 횡방향 모드와 비틀림 모드가 서로 연계되어 복

잡한 거동양상을 보이는 경우가 있는데 이러한 경우 다자유도 모델을 이용하여 이러한 특성을 표현할 수 있다.

Aeroelastic 모델은 건물의 외부형태를 정확하게 표현해야 할 뿐 아니라 저차모드의 동적특성을 갖도록 제작되어야 한다. Aeroelastic 모델의 형태 및 물성은 유사성이론(similarity theory)에 의해 결정되며 다음과 같은 양이 실제 건물과 부합하도록 제작한다 :

$$\text{mass scaling : } \frac{\rho_B}{\rho}$$

$$\text{stiffness : } \frac{E}{\rho V^2}$$

$$\text{damping : } \xi$$

여기서, ρ_B , ρ , E 와 V 는 각각 건물과 공기의 밀도, 영계수와 기준풍속이다. 바람의 turbulence의 wavelength는 약 1,500m 정도이고 터널에서 인위적으로 발생시킨 turbulence의 wavelength는 약 3~4m이므로 aeroelastic 모델의 크기의 축척은 1/400~1/500 정도가 적당하다. 공기의 밀도는 두 경우 거의 같기 때문에 모델의 밀도는 건물의 밀도와 같아야 한다.

Rigid body model 을 이용한 aeroelastic test 에서는 스프링에 부착된 strain gage와 컴퓨터의 자료처리시스템을 이용하여 건물이 받는 모멘트, 변위, 가속도 등을 직접 구하고 그 값들의 평균, RMS, 최대값 등을 산정한다. 모델의 고유주기와 댐핑값은 free vibration test를 통하여 구한다. 다자유도 모델은 보통 알루미늄으로 만든 기둥과 rigid diaphragm floor로 구성되는데 질량은 floor에 집중되도록 하고 기둥은 횡방향과 비틀림에 대하여 적절한 강성을 갖도록 만든다. 댐핑은 강성이 없는 foam tape으로 각 floor를 연결하여 고려하고 얇은 balsa wood로 표면을 구성하여 모델을 완성한다. 통상적으로 최상부에 세개의 가속도계를 설치하고 횡방향과 비틀림방향의 측정 데이터를 컴퓨터의 자료처리 시스템으로 전송하면 동시에 가속도로 환산된다.

Aeroelastic model test는 모델제작이 용이하지

않고 비용도 많이 들 뿐 아니라 소요기간이 2~3개월 필요하여 빈번하게 행하여지지는 않지만 과도한 동적응답이 염려되는 경우 행하여지고 있다. 특히 매우 가볍거나 감쇠력이 작은 재료로 시공된 건물, 모양이 매우 불규칙하거나 강성중심과 질량중심이 달라 과도한 비틀림현상이 발생할 가능성이 있는 경우, 높이에 비해 폭이 작은 건물등의 바람에 대한 동적거동을 알아보기 위해 이용되고 있다.

4. 내풍해석

바람에 의한 건물의 거동특성을 해석적으로 구하기 위해서는 풍하중의 정확한 수학적 모델과 함께 건물의 형태, 저차모드 고유진동수에 관한 자료가 필요하다. 저층건물의 경우 저차모드의 고유진동수가 비교적 커서 바람의 진동수성분과 공진현상을 일으킬 가능성이 적으므로 정적하중으로 간주하고 해석하여도 무리가 없으나 고층건물로 갈 수록 그 고유진동수가 바람의 주요 진동수 성분에 근접하므로 경우에 따라 확대된 동적효과가 일어날 수 있다.

4.1 풍하중의 모델링

건물의 j 층에 작용하는 풍압은 일반적으로 다음과 같이 가정한다:

$$F_j(t) = \frac{1}{2} \rho A_j C_D V_j^2 \quad (4.1)$$

윗 식에서 ρ 는 공기의 밀도, A_j 는 j 층의 풍속을 받는 면적, V_j 는 바람의 속도, 그리고 C_D 는 양력계수이다. 그리고 바람의 속도는 다음과 같이 평균풍속 \bar{V}_j 과 평균풍속에 대한 변동풍속 $\bar{V}_j \xi_j(t)$ 으로 다음과 같이 분리할 수 있다 :

$$V_j = \bar{V}_j [1 + \xi_j(t)] \quad (4.2)$$

여기서 평균풍속 \bar{V}_j 는 지표면으로부터의 높이에 따라 식 (2.1)과 같이 power law에 의하여 변한다 고 가정한다.

평균풍속에 의한 건물의 응답은 위에 정의된 풍

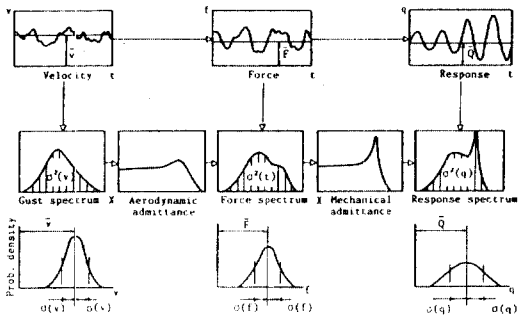


그림 8 도식화된 내풍해석의 과정

하중을 이용하여 일반적인 정적해석 방법에 의하여 쉽게 구할 수 있으나 바람의 변동성분은 매우 불규칙하므로 그 진동수 성분에 따른 에너지의 분포를 나타내는 스펙트럼을 이용한 random vibration 해석을 이용하여 변동성분에 의한 건물의 응답을 구하는 것이 일반적이다. 그림 8은 변동풍속(gust)의 스펙트럼에 바람과 건물의 크기에 의해 결정되는 aerodynamic admittance를 곱하여 풍하중의 스펙트럼을 얻고 다시 건물의 동특성을 나타내는 mechanical admittance를 작용시켜 반응스펙트럼을 얻는 과정을 나타낸다. Davenport에 의해 제안된 바람의 변동성분의 power spectrum (along wind) $S(n)$ 은 다음과 같다 :

$$S(n) = 4k_0 \frac{u_r^2}{n} \frac{x^2}{(1+x^2)^4} \quad (4.3)$$

여기서 n 은 진동수(Hz), u_r 은 지상 10m 높이에서의 평균속도(m/sec), k_0 는상수, $x = 1200n/u_r$ 이다. 위 식은 양의 진동수 영역에서의 일반 스펙트럼이다. 이것을 이면 스펙트럼으로 변환을 하고 각속도 ω (rad/sec)에 대한 스펙트럼으로 바꾸면 다음과 같다 :

$$S_f(\omega) = \frac{2k_0}{|\omega|} \left(\frac{u_r}{u_r} \right)^2 \left(\frac{600\omega}{\pi u_r} \right)^2 \left[1 + \left(\frac{600\omega}{\pi u_r} \right)^2 \right]^{-4/3} \quad (4.4)$$

풍속에 대한 건물의 거동을 정확히 설명하기 위해서는 속도의 증분의 영향을 고려해야 하므로 상대상관함수(Cross Correlation function)에 관한

것으로 변환을 하면 다음과 같다 :

$$S_f(\omega) = \frac{2k_0 u_r^2}{u_r u_r |\omega|} \left\{ \frac{\left(\frac{600\omega}{\pi u_r} \right)^2}{1 + \left(\frac{600\omega}{\pi u_r} \right)^2} \right\}^{-4/3} \exp \left[\left(-\frac{c_1 |\omega|}{2\pi} \right) \left(\frac{|i-j|h}{u_r} \right) \right] \quad (4.5)$$

위 식에서 c_1 은 7.7의 값을 가지는 상수이며 h 는 층의 높이 이다.

4.2 변동 풍하중에 의한 건물의 응답

일반적으로 건물의 운동방정식을 다음과 같이 구성할 수 있다 :

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = F(t) \quad (4.6)$$

M, C, K 는 각각 건물의 질량행렬, 감쇠행렬, 강성행렬이고 $F(t)$ 는 건물에 가해지는 풍하중 행렬이며 $x(t)$ 는 건물의 자유도이다. 위 운동방정식을 모드해석 방법(modal analysis)을 이용하여 단자유도계(single degree of freedom)의 운동방정식을 얻을 수 있다.

$$x = \phi \alpha \quad (4.7)$$

$$\ddot{\alpha}_i + 2\xi_i \omega_i \dot{\alpha}_i + \omega_i^2 \alpha_i = f_i \quad (4.8)$$

위 식에서 ϕ 와 α 는 모드행렬과 모드계수이며 f 는 $\phi^T F$ 이다. 또한 ξ_i 와 ω_i 는 각각 i 번째의 모드감쇠비와 고유진동수를 나타낸다. 그리고 위첨자 T 는 행렬의 전치(transposition)를 뜻한다. 따라서 단자유도계의 운동방정식을 해석하여 α 를 구하고 이것을 식 (4.7)에 대입하여 건물의 응답 x 를 구할 수 있다. 그러나 건물에 작용하는 풍하중은 지면에서만 작용하는 지진하중과 달리 모든 층에 가하여지고 또 그 성격이 매우 불규칙하기 때문에 시간영역에서의 해석은 매우 어렵다. 따라서 일반적으로 진동수영역으로 변환을 하여 바람의 변동성분에 의한 응답의 평균(Root Mean Square)을 구하는 방법이 사용된다. 해석에 사용될 풍하중의 스펙트럼이

결정되면 다음과 같이 모드좌표계 (modal coordinate) 로 치환할 수 있다 :

$$S_{ij}(\omega) = \phi^T S_{ff}(\omega) \phi \quad (4.9)$$

윗 식에서 $S_{ff}(\omega)$ 와 $S_{ff}(\omega)$ 는 각각 실제 좌표계와 모드 좌표계에 대한 풍하중의 스펙트럼이다. 모드 좌표계에서의 응답의 스펙트럼은 건물의 진동수 응답함수 (complex frequency response function) $H(\omega)$ 를 이용하여 다음과 같이 구해진다 :

$$S_{uv}(\omega) = H(\omega) S_{ff}(\omega) \bar{H}^T(\omega) \quad (4.10)$$

여기서 H 는 대각행렬 (diagonal matrix) 이며 j 번째 대각원소는 다음과 같다.

$$H_j(\omega) = \frac{1}{\omega_j^2 - \omega^2 + 2i\xi_j\omega} \quad (4.11)$$

위에서 i 는 복소수 상수이다. 결국 응답 x 의 power spectrum $S_{xx}(\omega)$ 를 다음과 같이 구할 수 있다 :

$$S_{xx}(\omega) = \phi H(\omega) \phi^T S_{ff}(\omega) \phi \bar{H}^T(\omega) \phi^T \quad (4.12)$$

응답 스펙트럼 함수 $S_{xx}(\omega)$ 를 모든 주파수 성분으로 적분하면 다음과 같은 변동풍속에 의한 응답의 평균치 (Root Mean Square) σ_x 를 구할 수 있다 :

$$\sigma_x^2 = \int_0^{\infty} S_{xx}(\omega) d\omega \quad (4.13)$$

이와 같이 변동풍속에 의한 건물 응답의 RMS값이 구해지면 응답의 최고값은 평균풍속에 의한 응답과 RMS값에 gust factor g 를 곱한 값을 합하여 산정한다 :

$$x_{max} = \bar{x} + g\sigma_x \quad (4.14)$$

5. 맺음말

고층건물에 의해 주변의 풍속이 증가하는 현상은 건물 가까이에서 가장 크고 건물에서 멀어질 수록

감소한다. 따라서 보행자나 인접 건물에 미치는 영향을 최소화 하기 위해서는 건물을 인접 건물이나 보행자도로에서 멀리 떨어져 건설하는 것이 바람직하다. 또한 건물의 표면을 타고 내려오는 하강풍의 영향을 줄이기 위해 건물의 저층부를 고층부보다 넓게 설계하거나 건물의 중간에 바람이 통과할 수 있는 개구부를 두기도 한다. 그 밖에도 건물의 평면을 유선형으로 만들거나 벽면에 요철을 두는 것도 바람에 의한 부정적 영향을 줄이기 위한 효과적인 방법이다.

참 고 문 헌

1. Islam, M. S., Ellingwood, B. and Corotis, R. B., "Dynamic response of tall buildings to stochastic wind load", Journal of structural Engineering, Vol. 116, No. 11, 1990
2. Isyumov N., "The aeroelastic modeling of tall buildings", International Workshop on Wind Tunnel Modeling Criteria and Techniques, Gaithersburg, Maryland, 1982
3. Isyumov N., Fediw A., Colaco J., "Performance of a tall buildings under wind action", 8th International Conference on Wind Engineering, London, Ontario, 1991
4. Isyumov N., "Wind action on highrise structures", Proceedings of a symposium organized by ASCE, Miami, Florida, 1994
5. Smith, B. S. and Coull, A., Tall building structures analysis and design, John Wiley & Sons, Inc., 1991
6. Taranath B. S., Structural Analysis and Design of Tall Buildings, McGraw-Hill, 1988
7. Yang, J. N. and Lin, Y. K., "Along-wind motion of multistory building", Journal of the engineering mechanics, Vol. 107, No. EM2, 1981
8. Wind Tunnel Testing: A General outline, The Boundary Layer Wind Tunnel Laboratory, University of Western Ontario, 1994 