

구조물의 풍동실험 방법

Wind Tunnel Experiments for Structures



유 기 표*
You Ki-Pyo



김 영 문**
Kim Young-Moon

1. 서론

건물이 고층화 될수록 풍하중의 영향이 커지게 되므로, 구조계획 및 설계시 중요한 요소로 다루어지게 된다. 특히 풍하중에 대해서 민감하게 반응하는 세장한 고층건물인 경우 즉 동적으로 불리하다라고 말하는 유연한 고층건물의 구조설계시에는, 풍하중에 의한 고층건물의 동적응답(진동변위나 가속도)효과를 고려하지 않으면 안된다.

그리고 이러한 동적응답에는 풍방향만의 응답뿐만 아니라, 이와 직각인 방향의 횡방향 응답과 비틀림 방향의 응답이 동시에 발생한다는 사실은 이미 잘 알려져 있다.

이와 같이 풍하중에 의해 생기는 고층건물의 진동 문제는 내풍설계시 그 중요성과 심각성이 인식되어 내풍공학(wind engineering)의 주요 과제로서 선진 여러 나라에서는 풍동실험에 기초해서 1960년대부터 연구해오고 있는 실정이다. 일반적으로 풍하중에 의한 고층건물의

동적응답을 구하기 위한 풍동실험으로는 매우 높은 고유진동수를 갖는 강체모형(rigid model)을 이용한 force-balance장치로 풍하중을 구한 후, 불규칙 진동이론에 근거해서 고층건물의 동적 특성 자료를 이용해서 동적응답을 계산하는 소위 풍력실험(high-frequency force-balance)과 고층건물의 동적특성을 상사법칙에 따라서 나타낸 공력탄성모형(aeroelastic model)을 이용해서 진동응답을 직접 구하는 공력탄성모형실험(aeroelastic model test)으로 나누어진다.

그리고 일반적으로 현대식 고층건물의 경우에 있어서 건물의 외장재는 건물의 외관을 결정하는 매우 중요한 설계요소로서 다루어 지게되며, 따라서 구조적으로 안전하게 설계되어야 함은 물론이다.

특히 도심의 고층건물인 경우, 태풍과 같은 강풍으로 인한 고층건물의 피해에서 가장 많은 피해가 발생하는 부분이다. 그러므로 이러한 외장재에 대한 안전한 내풍설계를 위해서, 건물의 임의의 부분에 작용하는 국부풍압의 크기를 올바르게 추정해야 되는데, 이런 목적으로 실행하는 풍동실험으로 풍압실험(pressure test)이 있다.

* 정회원 · 전북대학교 건축도시공학부 조교수

** 정회원 · 전북대학교 건축도시공학부 교수

2. 상사법칙

풍동실험의 경우, 어느 조건을 만족시키면, 실제의 현상을 재현할 수 있고, 모형의 실험결과로부터 실제 건물에 작용하는 풍하중과 풍하중에 의한 건물의 동적응답등을 추정할 수가 있게 되는데, 이와 같은 조건을 모형 실험에 있어서의 상사법칙(similarity law)이라고 한다.

풍동실험과 같이 축척 모형을 이용한 실험의 상사법칙에서는, 실물과 모형에서 무차원량(nondimensional parameter)을 같게 놓게 된다. 다시 말하자면, 측정된 개개의 물리량의 크기가 다를지라도, 이러한 양으로부터 이루어지는 무차원량이 동일하다면, 같은 현상을 알 수가 있게 된다. 결국 실물과 모형에서, 현상에 관계되는 물리량으로부터 얻어지는 무차원량을 일치시키면, 모형 실험에 있어서 실물과 상사된 현상을 재현할 수가 있다. 건물의 풍동실험에서 필요로 하는 상사조건으로는, 실험하는 건물 모형의 기하학적인 형상을 실물과 일치시켜야 하는 “기하학적 상사조건”과 실제의 건물에 작용하는 자연풍과 같은 성질을 갖는 풍을 풍동 내의 모형에 작용하도록 해야 하는 “운동학적상사조건”, 그리고 현상을 지배하는 힘의 평형상태를 실물과 풍동실험에서 상사시키지 않으면 안되는 “역학적 상사조건”이 있다.

3. 모형의 축척률

풍동실험에서 이용되는 모형의 축척은 기본적으로, 난류의 스케일 와 건물의 높이와의 비를 모형과 실물이 일치되도록 해서 결정하게 된다. 즉

$$\left(\frac{L_x}{H}\right)_{proto\ type} = \left(\frac{L_x}{H}\right)_{model} \quad (1)$$

(1)식으로부터 모형의 축척율은 다음 (2)식과 같이 구해진다.

$$\left(\frac{L_x}{H}\right)_{proto\ type} = \left(\frac{L_x}{H}\right)_{model} \quad (2)$$

여기서, L_x = 평균류방향의 난류 스케일

자연풍에서 평균류방향의 난류의 스케일은 지상 100m에서 180m 정도이고, 경계층 풍동내에서 만들어지는 난류의 스케일이 대체적으로 30~60cm 이므로, 모형의 축척율은 $\frac{1}{300} \sim \frac{1}{600}$ 정도가 된다.

4. 평균풍속의 결정

풍동실험 시의 평균 풍속은, 이론상 다음 (2-3)식과 같이 레이놀드 수(Reynold Number)를 일치시키는 조건으로부터 구할 수 있다.

$$\left(\frac{VB}{\nu}\right)_{model} = \left(\frac{VB}{\nu}\right)_{proto\ type} \quad (3)$$

여기서, B = 건물의 폭

ν = 동점성계수

(2-3)식에서 동점성계수 ν 는 모형과 실물에서 같은 값을 갖게 되므로, 풍동실험과 실물에 작용하는 평균 풍속의 비는 다음 (4)식과 같이 된다.

$$\frac{V_{model}}{V_{proto\ type}} = \frac{B_{proto\ type}}{B_{model}} \quad (4)$$

풍동실험에서 모형과 실물의 비가 $\frac{1}{300} \sim \frac{1}{600}$ 이 되므로, 풍동내의 풍속은 실물에 작용하는 자연풍속에 300~600배 정도가 된다. 그런데 이와 같은 풍속을 경계층 풍동내에서 만든다는 것은 거의 불가능하므로, 건물의 풍동실험에서는 레이놀드수를 실물과 일치시킬 수는 없다는 사실을 알 수 있다. 그러므로 풍속은 실험자가 판단해서 결정하는 것이 바람직하다.

5. 평균풍속의 수직분포와 난류의 강도

평균 풍속의 지상에서의 높이 방향으로의 수직분포는 다음 (5)식의 지수법칙(power law)과 (6)식의 대수법칙(logarithmic law)로 나타내게 한다.

$$\frac{U(z)}{U(z_r)} = \left(\frac{z}{z_r}\right)^a \quad (5)$$

여기서, $z =$ 구하고자 하는 평균 풍속이 작용하는 지상으로부터의 높이

$z_r =$ 기준 높이

$U(z) =$ z 위치에서의 평균 풍속

$U(z) = z_r$ 위치에서의 평균 풍속

$$U(z) = \frac{1}{k} U_* \ln \frac{z - z_d}{z_0} \quad (6)$$

여기서, $k =$ Karman 상수로서 보통 0.4

$U_* =$ 마찰 속도

$z_0 =$ 조도장(roughness length)

$z_d =$ 영면 변위(zero plane displacement)

일반적으로 풍동실험에서 많이 사용되는 (5)식을 사용한다. 평균류방향의 변동 풍속 성분을 $u(t)$ 라고 하면 $u(t)$ 에 대한 rms(root mean square) 값을 다음 (7)식과 같이 정의한다.

$$\sigma_u = \sqrt{\overline{u(t)^2}} \quad (7)$$

여기서, $\overline{u(t)^2} = u(t)$ 의 자승한 값에 대한 시간 평균값

(7)식으로 나타내는 σ_u 를 평균류방향의 평균 풍속 U 로 나눈 다음 (2-8)식의 I_u 를 난류의 강도(turbulence intensity)라고 정의한다.

$$I_u = \frac{\sigma_u}{U} \quad (8)$$

(2-8)식으로 정의되는 난류의 강도는 지표면의 조도에 따라서 다르게 되며, σ_u 는 지상에서의 높이에 따라서 크게 변하지 않으나 평균 풍속이 증가하게 되므로 I_u 값은 지상에서 높이 올라갈수록 감소하게 된다.

6. 풍동실험

6.1. 경계층풍동실험장치

현재 전북대학교에는 2종류의 풍동실험실이 있으며 실험목적과 규모에 따라 사용을 하고 있다. 1)Eiffel Type 2)Close Single Return Type 2종류가 있으며 이들 풍동의 제원은 아래 표 1과 같다. 그림 1은 풍동의 모습과 조감도를 보여주고 있다.

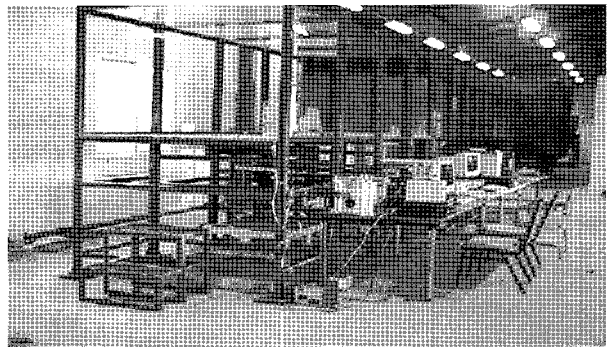
〈표 1〉 풍동의 제원

(a) Eiffel Type

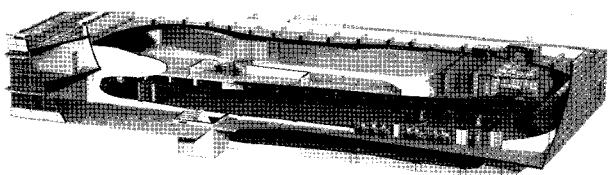
측정부길이	폭 .5m, 높이 1.2m, 길이 12m
풍동전체길이	24m
풍속	0.3-22.0m/s
텐테이블	직경 1.2m

(b) Close Single Return Type

항목	저속시험부	고속시험부
시험부크기	폭 12m, 높이 2.5m, 길이 40m	폭 5m, 높이 2.5m, 길이 20m
풍속	0.3-1.2.0m/s	0.5-30.0m/s
텐테이블	직경 11m	직경 4.5m



(a) Eiffel Type



(b) Close Single Return Type

〈그림 1〉 풍동의 형태별 전경과 조감도

6.2. 풍동실험의 종류와 목적

풍동실험은 목적에 따라 다양한 종류로 나뉘어 지며, 대표적인 풍동실험으로서는, 외장재 설계를 위한 풍압실험, 구조골조 설계를 위한 풍력실험, 건축물의 거주성·안정성 검토를 위한 공력진동실험, 풍환경 조사를 위한 풍환경실험 등이다.

1) 풍력실험 : 가볍고 강성이 큰 풍력 측정용 모형을 제작하여 건축물 전체 혹은 그 일부에 작용하는 풍하중의 평가를 위해서 실시한다. 평균풍속방향, 횡방향과 비틀림 방향의 평균풍력계수와 변동풍력계수를 측정하여 구조골조용 설계풍하중을 결정한다.

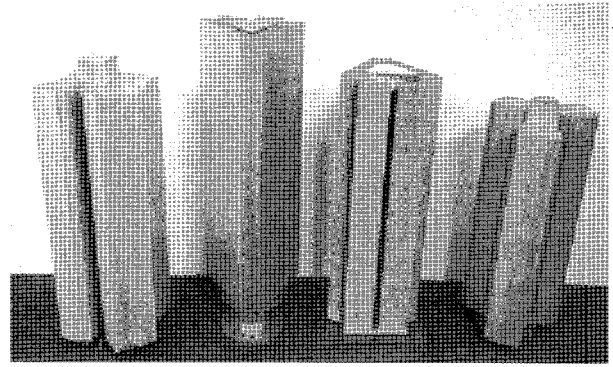
2) 풍압실험 : 아크릴로 제작된 풍압 측정용 모형에 작용하는 풍압력을 측정하는 실험이다. 측정된 풍압력은 평균풍압계수, 변동풍압계수, 최대 순간풍압 계수, 최소 순간풍압계수에 의해 평가되어 외장재 설계용 풍압력을 결정한다.

3) 공력진동실험 : 상사법칙에 따라 건축물의 진동특성을 모형화한 공력탄성모형을 이용해, 건축물의 거동을 재현하는 실험이다.

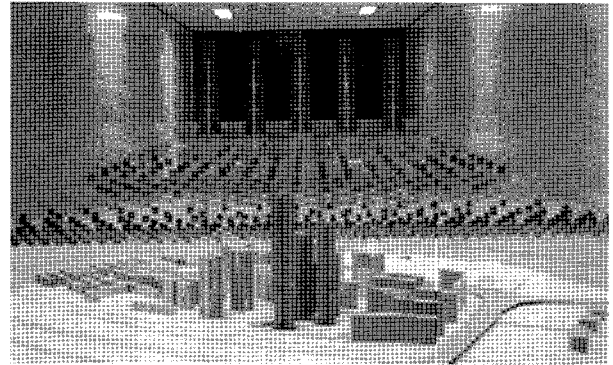
이 실험은 X방향, Y방향, θ방향의 진동과 가속도응답과 더불어 풍하중의 평가를 목적으로 실시된다. 공력진동실험에서는 응답치를 직접적으로 측정하는 것이 가능하다. 주로 고층건축물, 장스팬 건축물등을 대상으로 실시한다.

1) 풍력실험

풍력실험에서는 강제모형을 이용하게 되는데, 강제모형은 앞에서 언급한 바와 같이 기하학적 상사조건을 만족시키면서, 매우 가볍고 강성이 강한 모형으로 일반적으로 고유진동수를 50Hz이상 되도록 높게 만든다. 그러므로 이러한 강제모형은 발사(balsa)재를 이용해서 제작하는 것이 일반적이다. 그림 2에서는 이렇게 제작된 강제모형의 예를 나타내고 있다.



(a) 풍력실험모형



(a) 풍동내부에 설치된 모습

〈그림 2〉 강제모형

고층건물의 풍력을 측정하기 위해서는 풍동실험대상 건물의 모형을 풍동바닥면 아래에 설치된 측정기(force-balance)위에 고정시킨 후, 풍동내에 바람을 불어넣어 모형전체에 작용하는 풍력을 측정한다. 그리고 측정하려고 하는 변동풍력(풍하중)의 주파수 범위를 넓게 하려면, 강제모형의 고유진동수를 매우 높게 만들어 공진현상이 일어나지 않도록 해야 한다. 강제 모형으로 경계층 풍동내에서 force-balance를 이용해서 각 방향의 변동풍력을 측정한 후, A/D변환기를 이용해서 디지털 데이터로 변환한 후 스펙트럼 해석법에 따라서 변동 풍하중 스펙트럼을 구한다. 일반적으로 불규칙한 외력을 받는 구조물의 운동방정식은 다음과 식(9)와 같이 나타낼 수 있다.

$$M\ddot{X}(t) + C\dot{X}(t) + KX(t) = F(t) \quad (9)$$

여기서 건축물의 1차진동이 지배적이라면 건축물의 변

위를 일반화변위와 진동모우드의 곱으로서 식(10)과 같이 나타낼 수 있다.

$$x(z,t) = X_1(t) \cdot \mu_1(z) \quad (10)$$

여기서 $X_1(t)$: 1차 모우드에 대한 일반화 변위
 $\mu_1(z)$: 1차 진동 모우드

따라서 일반화 변위에 관한 다음의 운동방정식은 식(11)과 같다

$$M_1 \ddot{X}_1(t) + C_1 \dot{X}_1(t) + K_1 X_1(t) = F_1(t) \quad (11)$$

여기서 $M_1 = \int_0^H m(z)\mu_1(z)^2 dz$: 1차 모우드의 일반화 질량

- C_1 : 1차 모우드의 일반화 감쇠
- K_1 : 1차 모우드의 일반화 강성
- F_1 : 1차 모우드의 일반화 외력
- n_0 : 1차 고유 진동수

이러한 경우, 운동방정식은 1질점계와 동일한 형태로서 일반화 변위의 파워스펙트럼은 식(12)와 같이 일반화 외력의 파워스펙트럼과 역학적 Admittance의 곱으로 나타낼 수 있다.

$$S_{x_1}(n) = |H_1(n)|^2 \cdot S_{f_1}(n) \quad (12)$$

여기서 $S_{x_1}(n)$: 일반화 변위의 파워스펙트럼

$$|H_1(n)|^2 = \frac{1}{K_1^2 \left[\left\{ 1 - (n/n_0)^2 \right\}^2 + 4\zeta^2 \cdot (n/n_0)^2 \right]}$$

: 역학적 Admittance

- n_0, ζ_1 : 1차의 고유진동수, 1차의 감쇠정수
- $S_{f_1}(n)$: 1차 모우드의 일반화 외력의 파워스펙트럼

여기서 일반화 외력의 파워스펙트럼 $S_{f_1}(n)$ 은 전도 모멘트의 스펙트럼 $S_M(n)$ 을 이용해서 식(13)과 같이 나타낼 수 있다.

$$S_{f_1}(n) = \frac{1}{H^2} S_M(n) \quad (13)$$

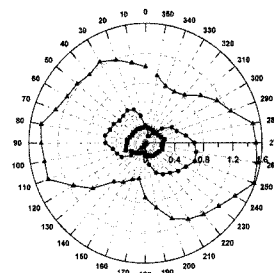
기본모드에 대한 일반화변위의 분산은 식(14)와 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \sigma_x &= \left[(1/H)^2 \cdot \int_0^\infty |x_1(n)|^2 S_{f_1}(n) dn \right]^{1/2} \\ &= \left[\frac{1}{\left\{ (2\pi n_0)^2 M_1 \right\}^2} \cdot \int_0^\infty \frac{1}{\left\{ 1 - (n/n_0)^2 \right\}^2 + 4\eta^2 (n/n_0)^2} \times \frac{S_M(n)}{H^2} dn \right]^{1/2} \end{aligned} \quad (14)$$

한편 감쇠정수가 작은 경우, 일반화 변위의 스펙트럼은 고유진동수 부근에서 예리한 피크를 가진 형태가 되므로 상기의 응답변위의 표준편차의 적분은 고유진동수 부근의 공진부분(A_B)과 비공진부분(A_R)으로 구분하여 근사적으로 식(15) 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \sigma_x &= (A_B + A_R)^{1/2} \\ &= \left[\frac{\sigma_M^2}{\left\{ (2\pi n_0)^2 M_1 \right\}^2} + \frac{\pi n_0 \cdot S_M(n_0)}{4\eta_1 \cdot \left\{ (2\pi n_0)^2 M_1 \right\}^2 \cdot H^2} \right]^{1/2} \\ &= \frac{\sigma_M}{(2\pi n_0)^2 M_1 \cdot H} \left(1 + \frac{\pi}{4\eta_1} \cdot \frac{n_0 S_M(n_0)}{\sigma_M^2} \right)^{1/2} \end{aligned} \quad (15)$$

여기서 σ_M : 전도 모멘트의 표준편차

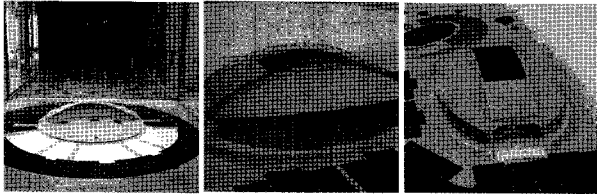


〈그림 3〉 각도변화별 변위응답결과

2) 풍압실험

풍압실험은 풍압모형에 작용하는 풍압력을 풍압계를 이용해서 측정하는 풍동실험의 한 종류이다.

그림4에 풍동내에 설치된 풍압모형으로부터 모형의 벽면에 작용하는 풍압력을, 벽면의 측정공에서 연결된 압력튜브를 풍압계로 연결해서 벽면에 작용하는 풍압을 측정하는 모습을 나타내고 있다.



(a) 풍동내 설치된 풍압모형



(b) 측압공 위치도 (c) 풍압력분포도

(그림 4) 풍압실험 모형과 결과

일반적으로 풍압모형은, 아크릴 판의 강한 모형으로 제작되며, 풍압측정공이 설치된다. 풍압측정공에는 작용하는 풍압력을 풍압계까지 유도하기 위한 압력튜브가 그림 5에 나타난 것과 같이 부착된다. 압력튜브로서는 내경 1mm 정도의 비닐 튜브가 많이 이용된다.

이렇게 해서 측정된 풍압력은 평균풍압계수, 변동풍압계수, 최대 및 최소풍압계수등으로 평가하게 된다.

① Mean Pressure Coefficient (평균 풍압계수)

$$: C_p = \frac{\bar{P}}{q_H}$$

② Maximun Pressure Coefficient (최대 풍압계수)

$$: C_{pmax} = \frac{P_{max}}{q_H}$$

③ Minimun Pressure Coefficient (최소 풍압계수)

$$: C_{pmin} = \frac{P_{min}}{q_H}$$

④ RMS Pressure Coefficient (RMS 풍압계수)

$$: C_{prms} = \frac{P_{rms}}{q_H}$$

단, $\bar{P} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N P_i$: 풍압력의 평균풍압

P_{max} : 풍압력의 최대치

P_{min} : 풍압력의 최대치

$q_H (= \frac{1}{2} \rho V_H^2)$: 풍압력의 최대치

($\rho = 0.125 kg \cdot s^2/m^4$)

3) 공력탄성모형 실험

공력탄성모형을 이용한 경계층 풍동실험의 경우, 공력탄성모형에 대한 상사법칙으로 공력탄성모형에는 실험대상인 실제의 고층건물의 동적특성을 나타내기 위한 대표적인 값으로는 탄성 매개변수(elastic parameter), 무차원 진동수 (reduced frequency), 질량비(mass ratio)의 세 가지 중에서 두가지와 감쇠비를 포함한 세 가지의 매개변수 값을 실제의 고층건물의 값과 일치시켜야 한다. 그런데 고층건물의 경우 탄성 매개변수를 일반적으로 무차원 진동수 속에 포함되므로, 실제로 고려해야 될 매개변수의 수는 다음의 세가지가 된다.

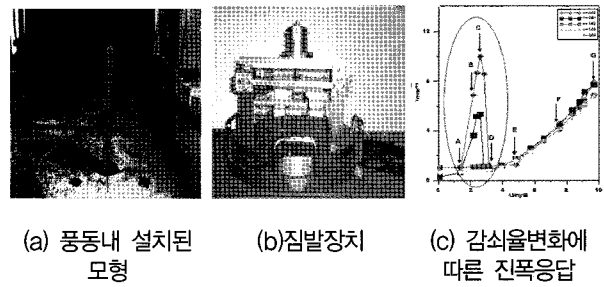
질량비 : $\left(\frac{m_j}{\rho b^2 h^2} \right)_M = \left(\frac{M_j}{\rho B^2 H^2} \right)_P$ (16)

무차원 진동수 : $\left(\frac{n_j \cdot b}{v} \right)_M = \left(\frac{n_j \cdot B}{V} \right)_P$ (17)

감쇠비 : $(\zeta_j)_M = (\zeta_j)_P$ (18)

여기서 v, V = 풍속의 대표값
 ρ = 공기의 밀도
 m_j, M_j = j 차 모우드에서의 모형과 실제 구조물의 일반화 질량
 b, B = 모형과 실제 구조물의 대표적인 길이로서 일반적으로 폭
 h, H = 모형과 실제 구조물의 높이,
 ζ_j = j 차 모우드의 감쇠비
 M, P = 모형(Model)과 실제 구조물 (Prototype structure)의 약자

앞에서 언급한 대로 실험할 대상인 고층건물의 공력탄성모형이 만들어지면 <그림 2>와 같은 풍동바닥 아랫면 밖에 세워진 짐발(gimbal)이라고 부르는 진동측정장치 위에 공력탄성모형을 고정한 후, 풍동실험에 들어가기 전에 우선 공력탄성 모형의 동적특성을 구하게 된다. 일반적으로 동적특성으로서는 진동을 측정하려고 하는 각 방향에 대한 공력탄성모형의 고유진동수와 감쇠비를 측정한다. 감쇠비를 조절하는 문제는 공력탄성모형실험에 선 매우 중요하다. 왜냐하면 휨진동과 비틀림진동 대부분이 감쇠비의 차이에 따라 민감하게 반응하기 때문이다. 감쇠비 조절은 점도(viscosity)가 서로 다른 실리콘 오일 등을 사용한다. 이렇게 모형준비작업이 끝나면, 바로 경계층 내에서 바람을 작용시켜서 모형의 진동응답 바로 구하게 된다. <그림 4>는 진동을 측정하는 짐발장치의 실험 및 장치 와 해석결과 나타내고 있다. 전반적으로 X,Y축 방향의 병진방향의 진동변위를 스프링에 설치되어 있는 스트레인 게이지로부터 측정하게 된다. 경우에 따라서는 z축 주위의 비틀림 방향의 진동변위도 측정할 수 있는 짐발 장치도 있으며, 각 방향의 진동변위 들간에 연성(coupling)이 있을 경우의 진동 변위를 측정할 수 있는 짐발 장치도 물론 있다. 진동실험을 위한 준비가 되면, 첫 번째 감쇠비와 고유진동수 상태에서 풍속을 증가시켜가면서 풍동 내에 바람을 불어넣어 모형의 진동응답을 측정해 나간다. 이때 풍속은 송풍기의 회전수인rpm에 의해 결정되므로 rpm의 증가정도를 정해놓고 시작하게 된다. 이렇게 해서 최대 풍속까지의 응답을 측정한 후에 다시 두 번째로 실리콘 오일의 점도를 변화시켜서



<그림 5> 공력진동실험 모형과 장치 및 결과

공력탄성모형의 감쇠비를 변화 시킨 후 진동응답을 구하려고 하는 각 방향에 대한 감쇠비와 고유진동수를 다시 측정 한 후에 풍속을 증가시켜가면서 다시 진동변위를 측정한다. 위의 과정을 반복하면서 원하는 감쇠비까지 변화시켜가면서, 진동측정실험을 계속하게 된다.

7. 결론

이상에서 살펴본 바와 같이 건축물의 합리적인 내풍설계를 위해서 필요한 풍동실험에 대해서 살펴보았다. 이러한 풍동실험은 이론적 해석이나 접근이 곤란하거나 불가능한 경우에도 바로 내풍설계에 활용할 수 있고 신뢰도가 높아지므로 많이 활용될 것으로 기대된다.

-참고문헌-

- 1.A. Kareem and J. E. Cermak, "Wind-Tunnel Simulation of Wind-Structure Interactions", ISA Transactions, Vol. 18, No.4, 1979
- 2."The Boundary Layer Wind-Tunnel Laboratory" The University of Western Ontario, March 1991.
3. A. Kareem, "dynamic Response of High-Rise Buildings to stochastic Wind Loads", J. of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1992,pp. 41~44
4. T. A. Reinhold. "Wind Tunnel Modeling for Civil Engineering Applications", Cambridge University Press,1992
- 5.김영문 역,실무자를 위한 건축물 풍동실험 가이드 북, 한국풍공학회 발행,1998