

튜브시스템에서 변동풍압의 보정

Correction of Fluctuation Pressure by Tube System

유 기 표* 김 영 문**
You, Ki-Pyo Kim, Young-Moon

Abstract

Measurement of fluctuating pressure by tube system is carefully designed due to the organ-pipe resonance. It is necessary to correct the pressure before analysis. The three method for correction the distortion fluctuation pressure, short tube length and the frequency response functions and insert a restrictor in the tube to increase the damping. The first method is useful when the tube length is short. In second method, the distorted signal through the tubing transformed into the frequency domain, dividing by transfer function and inverse fourier transforming back into the time domain gives the required pressure signal. In this paper three types of tubing which have different length of 100cm, 150cm, 200cm were experimented the distorted signal and correct the distortion signal

keywords : Correct, Restrictor, Transfunction, Resinance

1. 서 론

고층건물이나 장스팬구조물의 풍하중 평가는 여러 지점에 작용하는 풍력을 동시에 측정할 필요가 있다. 이러한 풍하중 평가는 풍력실험(High Frequency Force Balance Test)을 이용하면 손쉽게 평가할 수 있지만, 부분적으로 작용하는 풍력에 대한 측정은 불가능하다. 그러지만 압력변환기를 이용한 풍압실험에서는 부분적인 힘의 크기를 구할 수 있어, 외장재 뿐만 아니라 구조재의 풍력평가에 이용된다. 풍압실험에 사용되고 있는 압력변환기가 고가이고 풍압실험 모형에 직접 부착이 어려운 관계로 모형표면에 비닐 튜브를 연결하는 방법이 보편적으로 사용되고 있다. 그러나 이러한 방법으로 측정된 압력신호는 위상과 진폭의 왜곡이 발생한다. 이는 풍압신호가 튜브의 음향적 고유주파수와 근접하는 주파수에서 진폭이 급격히 증가하는 공진 현상 때문이다.

지금까지 튜브를 보정하는 여러가지가 방법이 제

안되었다. 이러한 보정방법으로 1977년 Irwin와 Surry에 의해서 제안된 튜브의 적당한 위치에 저항관(restrictor)을 설치하여 보정하는 방법이다¹⁾. 이 방법은 1987년 Holmes와 1986년 Kawai²⁾ 등에 의해서 실험적으로 증명된 방법이다. 이는 풍압실험에서 요구한 일정한 주파수 영역까지 보정을 할 수 있어 풍압보정방법으로 가장 폭 넓게 사용되고 있지만, 위상각 보정은 어려운 방법이다.

그리고 튜브의 길이에 따라 저항관의 위치가 변화하므로 요구하는 길이에 대해서 매번 실험을 해야 하는 번거로움이 있다. 1977년 Irwin에 의해서 제안된 다른 방법으로는 튜브시스템의 전달함수를 이용한 수치적인 보정법이다. 이 방법의 장점은 왜곡신호의 진폭과 위상각의 보정이 가능하고, 한번 보정이 되면, 길이에 대한 변화에 능동적 대처가 가능한 방법이다. 단점은 측정된 풍압신호의 전달함수를 전부 구해야 하므로 분석 시스템의 성능요구가 필요한 방법이다. 그 이후 1983년 Gymmley³⁾은 mainfold에 의한 이론적으로 풍압보정방법을 제안하기도 하였다.

본 논문에서는 튜브전달함수를 구하기 위해서 백

* 정회원 · 전북대학교 대학원 박사수료

** 정회원 · 전북대학교 건축 · 도시공학부 교수

색잡음을 튜브에 통과시키는 실험을 하여 튜브의 고유 특성을 파악한후, 이론적인 접근 방법으로 Bergh와 Tijdeman에 의해 제안된 원형 단면의 튜브내에 sin과 진동의 축 대칭 움직임을 기초로 하여 압력 전달 함수를 구한 후 실험식과 일치하는가를 확인해 보았다. 그리고 실제 풍압모형에서의 길이별 풍압보정효과에 대한 실험을 실시하였다.

2. 압력전달함수

2.1. Bergh-Tijdeman 방정식³⁾

튜브의 변동압력의 왜곡에 대한 보정은 전달함수가 구해질 때 가능하다. 전달함수는 모형 표면에 연결되는 튜브에 압력과 압력 변환기에 의해서 받아지는 압력과의 비를 각 진동수별로 나타낸 것이다. Bergh-Tijdeman은 Navier-Stokes방정식의 축방향 성분과 원주방향 성분의 에너지 방정식과 연속 방정식을 간소화하였다. 이 식에서 유체는층류(laminar)라고 가정하였고, 길이와 지름의 비가 매우 커서 튜브내벽의 온도변화는 없다고 가정한다. 이와 같은 조건을 만족하는 최종 미분방정식의 해는 다음과 같은 형태의 (1)식과 같은 Bessel-function해를 갖는다.

$$P = A \exp\left\{x(w/a_0) \left[\frac{J_2(\alpha)}{J_0(\alpha)}\right]^{1/2} (\gamma/n)^{1/2}\right\} + B \exp\left\{-x(w/a_0) \left[\frac{J_2(\alpha)}{J_0(\alpha)}\right]^{1/2} (\gamma/n)^{1/2}\right\} \quad (1)$$

여기서

$$n = \frac{1}{\left\{1 + \frac{\gamma-1}{\gamma} \frac{J_2(\alpha \text{Pr}^{1/2})}{J_0(\alpha \text{Pr}^{1/2})}\right\}}$$

$$\alpha = i^{3/2} R [(\rho_s w) / \mu]^{1/2} \text{ 전단 파수}$$

P : 변동 압력 w : 각진동수

a_0 : 음속 (m/sec) γ : 튜브내 기체의 단열지수

μ : 유체점성(kg/sec · m) C_p : 비열

k : 유체 전도도 $\text{Pr} = \mu C_p / k$ Prandl 수

x : 튜브의 입구에서부터의 축방향 거리

R : 튜브의 반지름

ρ_s : 기체의 평균밀도

J_0, J_2 : Bessel function의 0차, 2차 해

위 식은 미소의 조화 압력입력신호에 대한 원형 단면내의 유체에 대한 일반해이다. 상수 A, B 는 튜브의 단에서의 조건 즉 경계조건으로부터 결정된다. 이 식에 첫 번째 가정은 튜브에서 축방향 정상 흐름이 없다고 하는 것이다. 실제로는 이것은 튜브의 단이 닫힌 부피요소와 연결되었다는 것을 말한다. 다음은 N 개의 튜브 요소와 N 개의 부피요소가 배열되었을 때 Bergh-Tijdeman 식(2)으로 나타낸다.

$$\frac{P_{j-1}}{P_j} = \cosh(\Phi_j L_j) + \frac{V_j}{\pi R_j^2} \left(\sigma_j + \frac{1}{k_j}\right) n_j \Phi_j \sinh(\Phi_j L_j) + \left(\frac{R_{j+1}^2}{R_j^2}\right) \left(\frac{\Phi_{j+1}}{\Phi_j}\right) \left[\frac{J_0(\alpha_j)}{J_0(\alpha_{j+1})}\right] \left[\frac{J_2(\alpha_{j+1})}{J_2(\alpha_j)}\right] \times \left[\frac{\sinh(\Phi_j L_j)}{\sinh(\Phi_{j+1} L_{j+1})}\right] \left[\cosh(\Phi_{j+1} L_{j+1}) - \frac{P_{j+1}}{P_j}\right] \quad (2)$$

여기서

L : 튜브 요소의 길이 k : 부피요소의 팽창계수

$$\sigma : \text{부피요소 } \Phi_j = (w/a_0) \left[\frac{J_0(\alpha_j)}{J_2(\alpha_j)}\right]^{1/2} (\gamma/n_j)^{1/2}$$

위의 식은 연속적인 두 부피요소의 압력 전달함수로, 이의 연쇄적인 계산을 통해 모형과 압력 변환기를 연결하는 전체 튜브의 최종적인 전달함수를 구할 수 있다. 이로서 다른 크기의 튜브요소의 연결에 의한 효과가 고려될 수 있다. 단, 이 식은 앞서 언급했듯이 유체의 축방향으로 정상흐름이 없다는 가정 하에서 성립된다($u_s = 0, \rho_s = \text{상수}$). σ_j 는 부피요소의 벽이 단단할 때는 0으로 볼 수 있으나 벽이 막으로 둘러싸일 때 0으로 보지 않는다. V_j 는 다른 지름의 튜브가 연결될 때 연결 지점에 노드(부피요소)가 없을 때 0이 된다. (3)식과 같이 나타낼 수 있다.

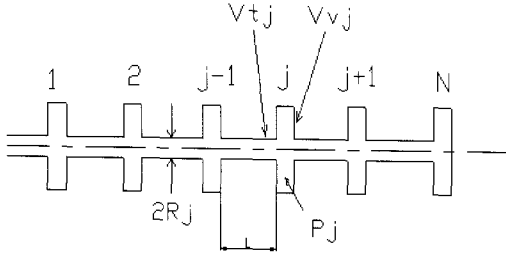
$$\frac{P_j}{P_0} = \left(\frac{P_j}{P_{j-1}}\right) \left(\frac{P_{j-1}}{P_{j-2}}\right) \left(\frac{P_{j-2}}{P_{j-3}}\right) \dots \left(\frac{P_2}{P_1}\right) \left(\frac{P_1}{P_0}\right) \quad (3)$$

위의 각 항의 압력비는 앞서 언급한 (2)식이다.

단, 압력변환기 막의 공진주파수는 튜브내 변동압력의 주파수보다 커야 한다.

2.2. 전달함수

본 연구는 다음 그림1과 같은 튜브 시스템에서 이루어졌다.



〈그림 1〉 도압관의 모형

부피요소 $V_1, V_2, V_3=0$ 이 $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3=0$ 이고, 또 V_4 는 고정이므로 0이 된다. 식(4)-식(8)은 각튜브에서의 변동압력을 식으로 나타내고 있다.

P_j 가 j 번째 튜브내의 변동압력일 때는, $j=1$ 에 대해서

$$\begin{aligned} \frac{P_0}{P_1} &= \cosh(\Phi_1 L_1) \\ &+ \frac{V_1}{\pi R_1^2} \left(\sigma_1 + \frac{1}{k_1}\right) n_1 \Phi_1 \sinh(\Phi_1 L_1) \\ &+ \left(\frac{R_2^2}{R_1^2}\right) \left(\frac{\Phi_2}{\Phi_1}\right) \left[\frac{J_0(\alpha_1)}{J_0(\alpha_2)}\right] \left[\frac{J_2(\alpha_2)}{J_2(\alpha_1)}\right] \\ &\times \left[\frac{\sinh(\Phi_1 L_1)}{\sinh(\Phi_2 L_2)}\right] \left[\cosh(\Phi_2 L_2) - \frac{P_2}{P_1}\right] \end{aligned} \quad (4)$$

여기서 $V_1=0$ 이므로

제 1번 도압관(모형벽면에 부착된 탭)

$$\begin{aligned} \frac{P_0}{P_1} &= \cosh(\Phi_1 L_1) \\ &+ \left(\frac{R_2^2}{R_1^2}\right) \left(\frac{\Phi_2}{\Phi_1}\right) \left[\frac{J_0(\alpha_1)}{J_0(\alpha_2)}\right] \left[\frac{J_2(\alpha_2)}{J_2(\alpha_1)}\right] \\ &\times \left[\frac{\sinh(\Phi_1 L_1)}{\sinh(\Phi_2 L_2)}\right] \left[\cosh(\Phi_2 L_2) - \frac{P_2}{P_1}\right] \end{aligned} \quad (5)$$

$j=2$ 에 대해서(탭에 연결된 튜브)

$$\begin{aligned} \frac{P_2}{P_1} &= \cosh(\Phi_2 L_2) \\ &+ \left(\frac{R_3^2}{R_2^2}\right) \left(\frac{\Phi_3}{\Phi_2}\right) \left[\frac{J_0(\alpha_2)}{J_0(\alpha_3)}\right] \left[\frac{J_2(\alpha_3)}{J_2(\alpha_2)}\right] \\ &\times \left[\frac{\sinh(\Phi_2 L_2)}{\sinh(\Phi_3 L_3)}\right] \left[\cosh(\Phi_3 L_3) - \frac{P_3}{P_2}\right] \end{aligned} \quad (6)$$

$j=3$ 에 대해서(압력변환기의 탭)

$$\begin{aligned} \frac{P_2}{P_3} &= \cosh(\Phi_3 L_3) \\ &+ \frac{V_3}{\pi R_3^2} \left(\sigma_3 + \frac{1}{k_3}\right) n_3 \Phi_3 \sinh(\Phi_3 L_3) \\ &+ \left(\frac{R_4^2}{R_3^2}\right) \left(\frac{\Phi_4}{\Phi_3}\right) \left[\frac{J_0(\alpha_3)}{J_0(\alpha_4)}\right] \left[\frac{J_2(\alpha_4)}{J_2(\alpha_3)}\right] \\ &\times \left[\frac{\sinh(\Phi_3 L_3)}{\sinh(\Phi_4 L_4)}\right] \left[\cosh(\Phi_4 L_4) - \frac{P_4}{P_3}\right] \end{aligned} \quad (7)$$

여기서 $R_4=0, P_4=0$ 이므로

$$\begin{aligned} \frac{P_2}{P_3} &= \cosh(\Phi_3 L_3) \\ &+ \frac{V_3}{\pi R_3^2} \left(\sigma_3 + \frac{1}{k_3}\right) n_3 \Phi_3 \sinh(\Phi_3 L_3) \end{aligned} \quad (8)$$

결과적으로 구하고자 하는 전달함수 T 는식(9)와 같다.

$$T = \frac{P_3}{P_0} = \frac{1}{\frac{P_0}{P_1} \times \frac{P_1}{P_2} \times \frac{P_2}{P_3}} \quad (9)$$

이론식 전개를 위해 사용된 압력전달함수의 계산에 이용된 조건은 다음과 같다.

$$a_0 = 340\text{m/sec}, \gamma = 1.4, \mu = 1.8 \times 10^{-5} \text{kg/m} \cdot \text{sec}$$

$$\text{Pr} = \mu C_p / k = 0.73, \rho_s = 1.2 \text{kg/m}^3, \sigma = 0$$

$$V_1, V_2, V_3 = 0$$

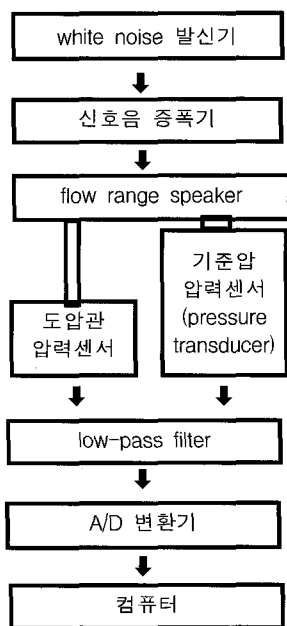
2.3. 압력 전달특성의 측정

광범위한 주파수 영역에 걸친 압력전달함수를 측정하기 위해서 백색잡음(white noise)를 발진기(B&K 1405)로 스피커를 조합한 변동압력발생장치를 이용했다. 그림 2에는 측정 과정을 보여주고 있다. 표1은 측정과정에 사용되고 있는 실험기기를 나타내고 있

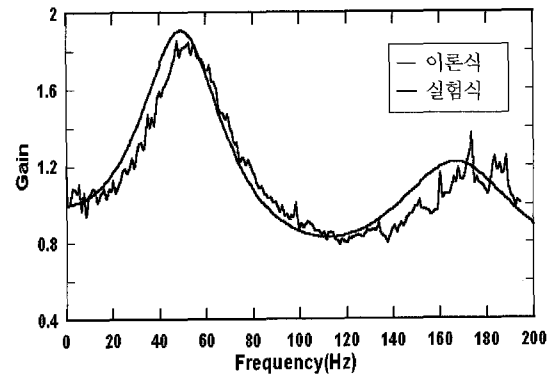
다. 기준으로 하는 압력변환기와 실험을 대상으로 하는 튜브 시스템을 접속하였으며, 시험용 압력변환기는 차압형 압력계(Kyowa F97-2024)을 이용했다. 기준압력측정은 공기조의 영향을 제거 하기 위하여 스피커가 부착된 맥동 공기조의 아크릴에 직접 연결했으며, 이 아크릴의 고유진동수는 1750Hz로 실험 대상으로하는 0~200Hz에 대해서 충분히 높다. 튜브의 압력변환기는 차압형 압력계를 사용하여서 측정하였다. 제 1의 도압관의 내경(2R1)은 0.5cm, 길이(L1)은 5cm의 스텐레스제의 파이프이다. 제 2의 도압관의 내경(2R2)은 0.5cm의 테트론 튜브로, 길이(L2)는 100cm이다. 제 3의 도압관은 압력계의 접속 관에서 내경(2R3)이 0.5cm, 길이 5cm이다. 압력계의 출력을 로패스필터(low-pass filter)를 거친 후, A/D 변환해서 컴퓨터에 저장한 다음 고속 Fourier 변환법에 의해 압력 측정 시스템의 주파수 응답함수(압력전달함수)를 구했다.

〈표 1〉 측정용 실험기기

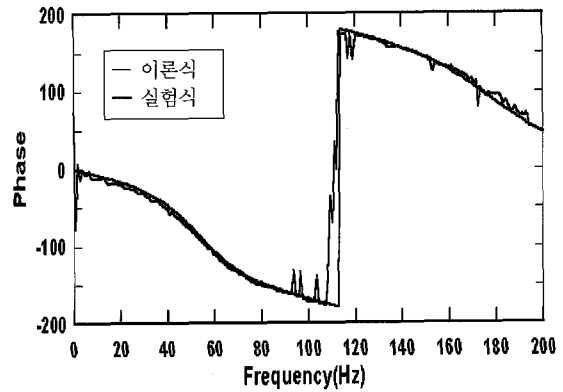
실험기기	측정범위
white noise Generator	B&K TYPE 1405
pressure transducer	F97-2024 ± 25mmAg
Low-pass filter	Teac SA-100D
A/D 카드	NI-Das-1200



〈그림 2〉 압력전달함수 측정과정

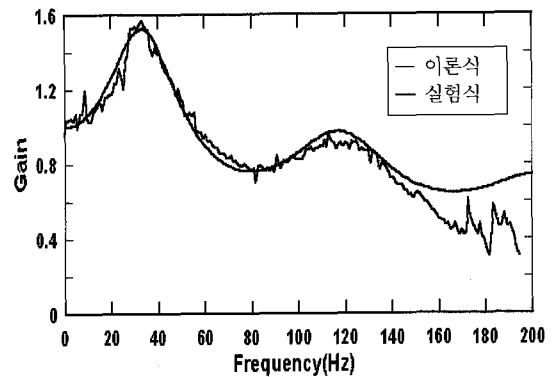


(a) 게인

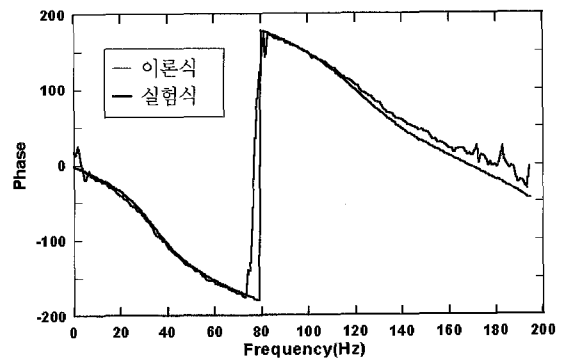


(b) 위상각

〈그림 3〉 압력전달특성(튜브길이: 100cm)

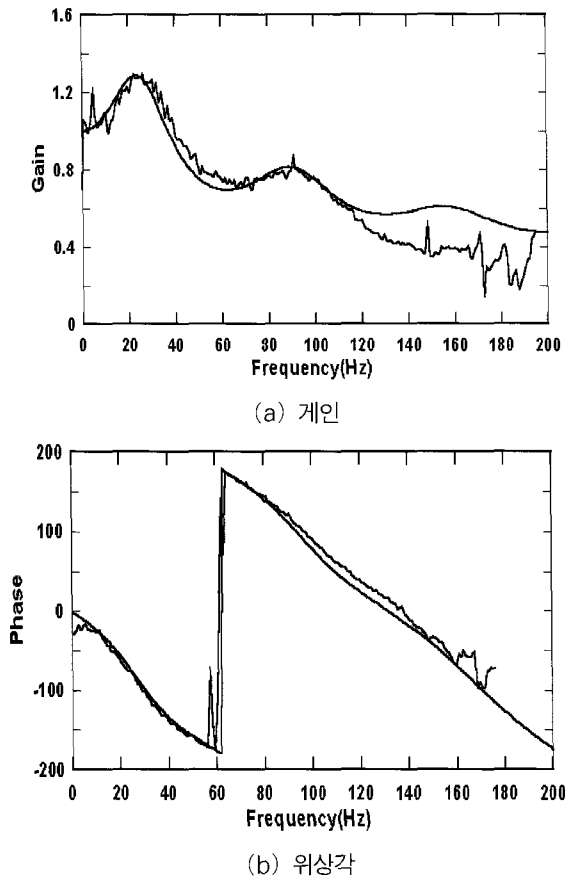


(a) 게인



(b) 위상각

〈그림 4〉 압력전달특성(튜브길이: 150cm)



〈그림 5〉 압력전달특성(튜브길이:200cm)

그림 3~그림 5는 튜브길이가 100cm, 150cm, 200cm에 대한 게인(Gain)과 위상각(Phase)의 압력 전달특성을 나타내고 있다. 100cm의 경우가 가장 잘 일치하고 있으며, 150cm와 200cm는 Gain 값에서 고주파 영역에서 차이가 있었지만 위상각에서 크게 차이가 없는 것으로 나타나고 있었다. 이론식에 의한 게인과 위상각의 압력전달함수가 실험결과 거의 일치하고 있는 것으로 판단되므로 이론식을 이용해서 길이별 압력전달함수를 만들어서 사용을 하여도 충분하다고 판단된다.

3. 압력관의 보정방법

이론식에 구한 튜브의 압력전달함수는 주파수에 대한 함수이므로 풍동실험에 의해 얻어진 시간영역의 데이터는 주파수영역으로 전환할 필요가 있다. 데이터가 Δt 의 시간 간격으로 N개일 때 $j=0, 1, 2, 3, \dots, N-1$ 으로 주어지면, 이의 주파수영역으로의 변환

은 식(10)과 같은 고속 푸리에 변환식으로서 얻어진다.

$$P(k) = \sum_{j=0}^{N-1} P(j) \cdot \exp[-i \cdot 2\pi \frac{k \cdot j}{N}] \cdot \Delta t \quad (10)$$

단, $k=0, 1, 2, 3, \dots, \frac{N}{2}-1$ 이다.

위의 식은 복소수형태로서 실수부 $P_r(k)$ 와 허수부 $P_i(k)$ 로 나뉘어진다. 따라서 데이터의 절대치 $A_p(k)$ 와 위상각 $\Phi_p(k)$ 는 각각 식(11)과 같이 주어진다.

$$|A_p(k)| = \sqrt{P_r(k)^2 + P_i(k)^2} \quad (11)$$

$$\Phi_p(k) = \tan^{-1}\{P_r(k)/P_i(k)\}$$

앞서 구한 압력 전달함수에서 실수부 $T_r(k)$ 와 허수부 $T_i(k)$ 를 분리하여 절대값과 위상각을 구하면 식(12)와 같다.

$$|A_T(k)| = \sqrt{T_r(k)^2 + T_i(k)^2} \quad (12)$$

$$\Phi_T(k) = \tan^{-1}\{T_r(k)/T_i(k)\}$$

이다. 이를 이용하여 식(13)의 원데이터를 보정하면 보정된 데이터의 절대치 $A_c(k)$ 와 $\Phi_c(k)$ 는 다음과 같다.

$$|A_c(k)| = \frac{|A_p(k)|}{|A_T(k)|} \quad (13)$$

$$\Phi_c(k) = \frac{\Phi_p(k)}{\Phi_T(k)}$$

따라서 보정 데이터의 실수부 $C_r(k)$ 와 허수부 $C_i(k)$ 는 다음식 (14)와 같다.

$$C_r(k) = |A_c(k)| \cdot \cos \Phi_c(k) \quad (14)$$

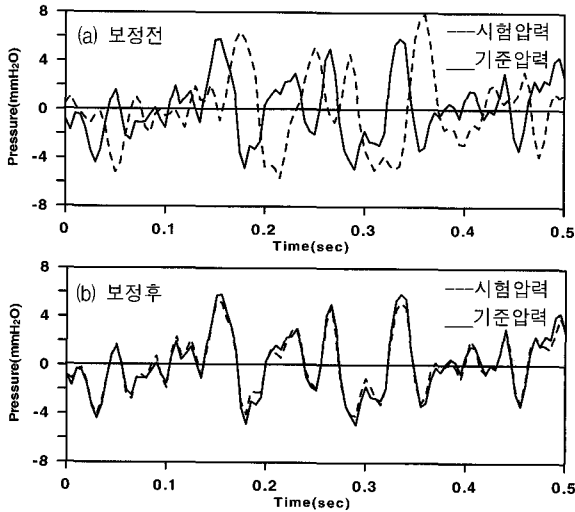
$$C_i(k) = |A_c(k)| \cdot \sin \Phi_c(k)$$

그러므로 보정된 데이터는 식(15)을 이용하여 구한다.

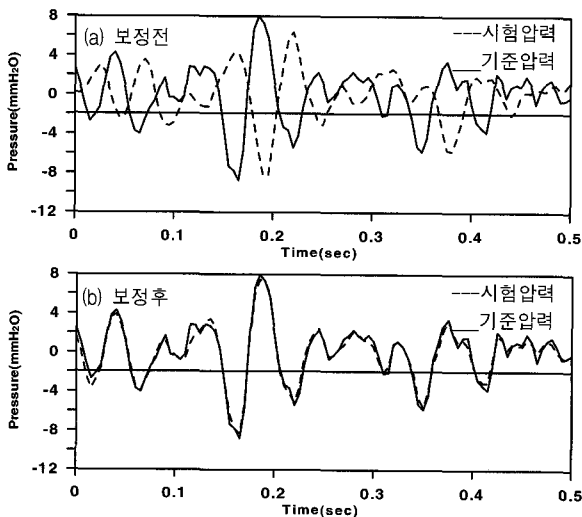
$$C(k) = C_r(k) + i \cdot C_i(k) \quad (15)$$

이다. 이 값을 역 푸리에 변환에 의해 시간영역으로 전환시키면, 식(16)과 같다.

$$C(j) = \sum_{k=0}^{N/2-1} C(k) \cdot \exp(i \cdot 2\pi \frac{j \cdot k}{N}) \cdot \frac{2}{N \cdot \Delta t} \quad (16)$$



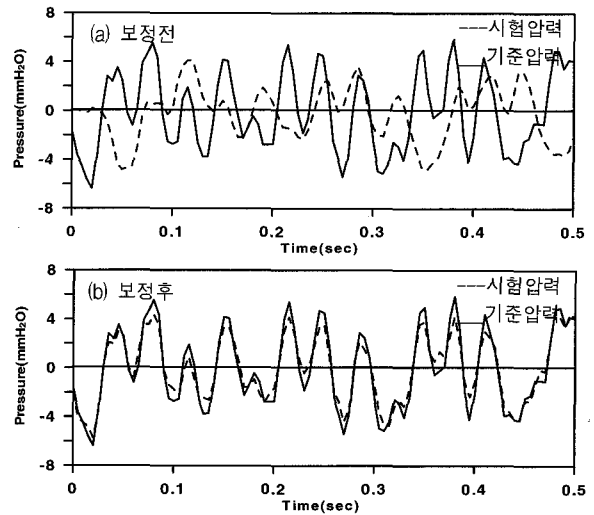
〈그림 6〉 압력 튜브 100cm의 보정전과 보정후



〈그림 7〉 압력 튜브 150cm의 보정전과 보정후

그림 6~8은 100cm, 150cm, 200cm의 압력튜브의 왜곡된 변동풍압신호에 대한 이론식에서 구한 압력 전달함수를 이용하여 보정전과 보정후의 시간이력을 나타내고 있다. 압력튜브가 100cm, 150cm는 시간 이력에 대한 보정값이 잘 일치하고 있었으나 압력튜

브가 200cm에서 위상각은 잘 일치하고 있었지만, 피크가 되는 압력값들이 보정후 조금 적게 나타나고 있었는데 이는 보정에 사용된 압력전달 함수의 Gain 값이 실제압력값과의 차이에서 원인이 있는 것으로 판단된다.



〈그림 8〉 압력 튜브 200cm의 보정전과 보정후

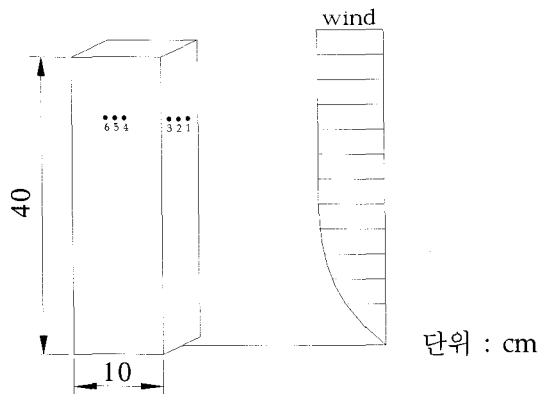
4. 실험결과비교

튜브시스템을 사용하여 구한 풍압실험의 보정전의 풍압계수와 보정후의 풍압계수의 차이를 구하기 위하여 실험용 모형을 만들었다. 풍동실험에 사용된 경계층은 전북대학교 내풍연구실에서 보유하고 있는 풍동을 사용하였으며, 조도구분이 교외지역에 해당되는 $\alpha = 0.15$ 을 풍동내에 재현하였다. 풍동실험에 사용된 모형의 변장비가 1이고 종횡비가 4인 정방형 모형을 만들었다. 측정점의 위치는 정면, 측면 모두 0.8H부분 중앙부근처에 100cm, 150cm, 200cm을 3개의 측압공을 배치한후 실험을 실시하였다. 측정모형은 그림 9과 같다. 사진1은 풍동내에 설치된 실험용 풍압모형모습을 보여주고 있다. 실험풍속은 모형의 최상층 높이에서 4m/s로 하였다. 실험에 사용된 풍압계는 보정실험에 사용된 같은 풍압계를 사용하였다. 표2은 실험에서 얻는 결과를 나타내고 있으며, 실험분석은 보정전과 보정후의 평균풍압계수와 변동풍압계수를 분석하였다. 분석에 사용된 식은 (17), (18)과 같다.

$$\text{평균풍압계수} : C_p = \frac{\overline{P}}{q_H} \quad (17)$$

$$\text{변동풍압계수} : C_p' = \frac{\sigma}{q_H} \quad (18)$$

여기서 $q_H = \frac{1}{2} \rho U_h^2$



<그림 9> 풍동모형 Tap 위치와 풍향



<사진 1> 풍동내 설치 풍압모형

<표 2> 보정전과 보정후의 풍압계수

탭번호		보정전		보정후	
		C_p	C_p'	C_p	C_p'
정면	1(100cm)	0.601	0.346	0.601	0.325
	2(200cm)	0.739	0.323	0.738	0.333
	3(150cm)	0.706	0.321	0.706	0.313
측면	4(100cm)	-1.114	0.545	-1.113	0.475
	5(200cm)	-1.182	0.434	-1.181	0.468
	6(150cm)	-1.127	0.537	-1.126	0.471

4.1. 실험결과분석

평균풍압계수는 모형의 정면과 측면에서 길이에 관계없이 보강전과 보강후 차이가 없었다. 정면부분의 변동풍압계수는 보강전·후의 차이가 7%정도 나타나고 있었으나 측면의 경우는 10-13%정도의 차이가 나타나고 있었다. 이는 측면에서 난류에 의한 변동이 정면보다 크게 나타나고 있기 때문이다. 길이에 따라 변화의 폭이 다르게 나타나고 있었다. 그리고, 튜브길이가 길어지면 오히려 변동풍압계수가 증가하는 것이 아니고, 감소될 수 있어 변동풍압계수를 과소평가가 될 수 있는 것으로 확인되었다.

5. 결 론

이상의 풍압실험에 사용되는 튜브시스템의 튜브 보정에 대한 이론과 실험고찰 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

튜브보정을 위해서 사용된 압력전달함수는 길이와 압력계의 종류에 따라 능동적으로 대처할 수 있었다. 튜브 길이가 길어지면, 변동풍압계수의 경우는 오히려 과소평가 될 수 있으므로 적당한 튜브길이를 선택해야 한다는 것을 확인할 수 있었다.

참고문헌

1. D.Surry, T.Stathopoulos(1977). An Experimental Approach to the economical measurement of spatially-averaged wind loads. Jour. of Industrial Aerodynamics 2, 385~397
2. Kawai, H(1986). New method for correcting distortion of fluctuating pressure of tubing system in time domain.
3. S.J.Gumley(1983). Tubing system for pneumatic averaging of fluctuating pressures. Jour. of Wind Eng. and Industrial Aerodynamics 12, 189~228
4. 김영문역(1998). 건축물 풍동실험 가이드북, 한국 풍공학회