

〈論 文〉

2차원 원형 풍동의 공진 특성

백 기 영* · 이 인**

(1990년 2월 15일 접수)

Resonance Characteristics for 2-Dimensional Circular Wind Tunnel

Ki-Young Baik and In Lee

Key Words : Resonance Characteristics(공진 특성), Wind Tunnel(풍동), Interior Acoustics(내부 음향학)

Abstract

A finite element method is used for analyzing the resonance characteristics of circular wind tunnel. Two-dimensional circular wind tunnel with one and three slots is considered. The wind tunnel resonance characteristics are affected by the number and position of the slots of the wind tunnel. The resonant frequencies for the vertical vibration mode are higher than those for the horizontal vibration mode. The resonance frequencies increase as the open area ratio increases.

기 호 설 명

- | | |
|--------------------------------------|------------------------------|
| a_0 : 음속 | t : 시간 |
| a_e : 방정식 (7)에 정의된 유효음속 | U : 자유 흐름의 속도 |
| $[B]$: 방정식 (17)에 정의된 행렬 | x, y, z : 직교 좌표계 |
| d : 슬롯의 넓이 | α : 진동수 (wave number) |
| D : 원형 풍동의 지름 | β : $\sqrt{1-M^2}$ |
| e : 슬롯의 열린면적비 | ρ : 교란된 흐름의 밀도 |
| f : 진동수 (Hz) | ϕ : 풍동내의 미소섭동 속도 포텐셜 |
| F : 여 계에 대한 variational functional | ω : 각 진동수 |
| $[k]$: 요소 강성 행렬 | λ : 무차원 공진 진동수 |
| $[K]$: 전체계에 대한 강성 행렬 | |
| M : 자유 흐름의 마하수 | |
| $[m]$: 요소 질량 행렬 | |
| $[M]$: 전체계에 대한 질량 행렬 | |
| n : 면에 수직인 벡터 | |
| $[N]$: 형상 함수의 행 벡터 | |
| p : 교란된 압력 (perturbation pressure) | |
| $\{P\}$: 절점 압력값의 열 벡터 | |
| R : 원형 풍동의 반지름 | |

1. 서 론

풍동의 공진 현상은 진동하는 날개에서 생긴 교란이 풍동벽에서 이 교란을 증가시키는 상(phase)을 가지고 반복적으로 반사될 때 일어나는 음향학적인 현상이다.

풍동에서 항공기 날개의 플러터 및 비정상 날개에 작용하는 공기력 측정과 같은 동적인 풍동 실험의 결과는, 날개의 진동수가 풍동의 공진 진동수 근처에 있을 때에 풍동의 공진 현상에 의하여 많은

*한국과학기술원 항공공학과

**정회원, 한국과학기술원 항공공학과

영향을 받는다. 이러한 공진하에서, 동적인 풍동 실험의 결과는 자유 비행의 결과와 상당한 오차를 갖는다. 따라서, 풍동의 공진 진동수를 정확히 예견하고자 하는 다양한 연구가 수행되어 왔다. Runyan과 Watkins⁽¹⁾는 영상(image)방법을 사용하여 진동하는 모델에 미치는 힘을 측정할 때 나타나는 풍동의 공진현상을 2차원 날개의 밀폐된 풍동에 대해 이론적으로 해석하였다. Widmayer⁽²⁾는 4각 날개에 작용하는 공기역학적인 힘과 모멘트를 측정하는 실험에서, 풍동의 공진현상을 관측하였다.

많은 풍동은 모델과의 간섭 효과를 줄이기 위해서 흐름의 방향과 평행한 여러 개의 슬롯을 가진다. Acum⁽³⁾은 해석적인 방법으로 슬롯을 가지는 4각 단면의 풍동에 대한 공진 조건을 구하고 해석하였으며, 그는 이 논문에서 슬롯을 가지는 풍동의 공진 진동수가 같은 단면의 밀폐된 풍동의 공진 진동수보다 더 높다고 제시하였다. Mabey⁽⁴⁾는 슬롯을 가지는 4각 풍동에 대한 플리넘실(plenum chamber)효과를 이론적으로 해석했다. 그러나, 임의의 단면 모양을 갖는 갖는 풍동의 공진 특성과 슬롯크기의 변화가 풍동의 공진 특성에 미치는 영향을 이론적으로 예측하기는 어려우며, 이런 경우에 유한요소법은 매우 유용한 방법이다.

Gladwell과 Zimmernann^(5,6)은 음향과 구조진동계에 대한 에너지 및 여 에너지(complementary energy)에 대한 식을 유도하고, 이러한 문제는 변위 또는 압력만의항으로 공식화할 수 있다는 것을 보였다. Lee^(7,8)는 유한요소법을 사용하여 4각형 및 8각형 풍동에 대한 공진 특성을 고찰하였으나 본 논문에서는 슬롯을 가지는 2차원 원형 풍동에 대하여 슬롯의 갯수, 크기와 흐름의 속도에 따른 공진 특성을 2차원 8-노드 등계수(isoparametric) 요소를 사용하여 해석한다.

2. 운동방정식과 경계조건

풍동의 단면과 측면이 Fig. 1과 2에 보여진다. 풍동의 지름은 D 이며, 풍동 안의 속도와 마하수는 균일하다고 가정한다. 교란된 압력, 밀도 그리고 온도 등은 평형 상태의 값에 비해서 작다고 가정하며, 슬롯은 얇으며 유체의 점성 효과는 없다고 가정한다.

Fig. 1과 2에 주어진 직교 좌표계를 고려하면,

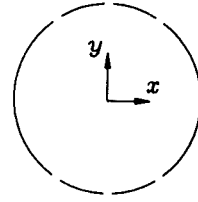


Fig. 1 Cross section of wind tunnel

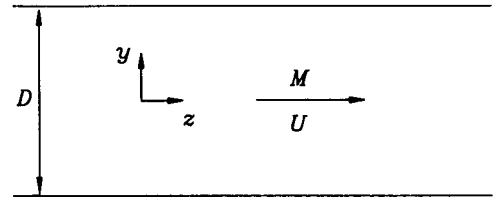


Fig. 2 Side view of wind tunnel

풍동 안의 미소섭동 속도 포텐셜 ϕ 는 다음과 같은 방정식을 만족한다.

$$(1-M^2)\phi_{zz} + \phi_{xx} + \phi_{yy} - \frac{2M^2}{U}\phi_{zt} - \frac{M^2}{U^2}\phi_{tt} = 0 \quad (1)$$

많은 풍동은 모델과의 간섭효과를 줄이기 위해서 흐름의 방향과 평행한 여러 개의 슬롯을 가지며 Fig. 1에서와 같이 열려진 부분이 슬롯이다. 풍동 벽에서 경계조건은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial \phi}{\partial n} &= 0 \text{ on the solid wall} \\ \phi &= 0 \text{ on the slot} \end{aligned} \quad (2)$$

모델이 없는 풍동안의 흐름은 모든 곳에서 $\phi=0$ 으로 주어진다. 그러나, 풍동의 공진현상을 규명하기 위해서 위와 같은 경계조건을 만족하는 식 (1)의 해중 영이 아닌 해를 얻어야 한다.

풍동의 내부에 대하여 다음과 같이 교란 형태를 가정한다.

$$\phi = \phi_R = \Phi(x, y)e^{i\alpha z}e^{i\omega t} \quad (3)$$

여기서 Φ 는 x 와 y 의 함수이며 α 는 진동수(wave number)이다.

Acum⁽³⁾이 유도한 풍동의 공진조건은 다음과 같다.

$$\alpha = \frac{M^2 \omega}{U\beta^2} \quad (4)$$

여기서 $\beta = \sqrt{1-M^2}$ 이다. 식 (3)과 식 (4)를 식 (1)에 대입하면

$$\phi_{xx} + \phi_{yy} + \left(\frac{\omega}{a_0\beta}\right)^2 \phi = 0 \quad (5)$$

식 (3)을 고려하면 식 (5)는 다음과 같이 된다.

$$\phi_{xx} + \phi_{yy} - \left(\frac{1}{a_0\beta}\right)^2 \phi_{tt} = 0 \quad (6)$$

이 방정식은 다음과 같이 유효음속을 가지는 파동 방정식이다.

$$a_e = a_0\beta = a_0\sqrt{1-M^2} \quad (7)$$

교란된 압력과 속도 포텐셜 사이의 관계식은

$$P = -\rho \left(\frac{\partial \phi}{\partial t} + U \frac{\partial \phi}{\partial z} \right) \quad (8)$$

식 (3)으로부터 교란된 압력은 다음과 같이 주어진다.

$$P = -i\rho(\omega + \alpha U)\phi \quad (9)$$

식 (3), (4)와 식 (9)를 사용하면 다음과 같은 식을 얻는다.

$$P_{xx} + P_{yy} + \left(\frac{\omega}{a_e}\right)^2 P = 0 \quad (10)$$

식 (9)로부터 경계조건은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\frac{\partial \phi}{\partial n} = 0 \quad \text{on the rigid boundary} \quad (11)$$

$$P = 0 \quad \text{on the slot}$$

여기서 n 은 경계면에 수직인 방향이다. 식 (10)과 식 (11)은 풍동안의 지배방정식과 경계조건이다.

3. 유한요소법

변분법은 동력학, 구조역학, 그리고 연속체역학 등에 폭넓게 사용되어 왔다. 이 변분원리는 최근에 음향문제와 음향과 구조물간의 간섭 문제에 적용되고 있다^(9~11). Gladwell^(5,6)은 음향과 구조진동계에 대한 에너지 및 여 에너지에 대한식을 유도하였다. 본 연구에서는 풍동의 공진 현상을 해석하기 위한 유한요소법을 수식화하는데 여 에너지를 사용할 것이다.

풍동안의 적절한 범함수는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$F = \frac{1}{2\rho a_e^2} \int_V p^2 dv - \frac{1}{2\rho\omega^2} \int_V (\nabla p)^2 dv \quad (12)$$

식 (12)에 정지 여 에너지원리(stationary complementary energy principle)⁽⁶⁾을 적용하면 식 (10)과 식 (11)에 있는 지배방정식과 경계조건을 얻을 수 있다. 따라서 식 (12)를 유한요소법을 수식화하는데 사용한다.

각각의 요소 내에서 압력분포는 다음과 같이 근사화할 수 있다.

$$P = [N]_i \{p\}_i \quad (13)$$

여기서 $[N]_i$ 는 i 번째 요소에 대한 형상 함수의 행 벡터이다. 그리고 $\{p\}_i$ 는 그 요소에서 각 절점의 압력으로 이루어진 열 벡터이다.

식 (13)을 식 (12)에 대입하면 풍동안의 각 요소에 대하여 다음 식을 얻는다.

$$F_i = \frac{1}{2\rho\omega^2} (\omega^2 \{p\}_i^T [K]_i \{p\}_i - \{p\}_i^T [m]_i \{p\}_i) \quad (14)$$

여기서

$$[K]_i = \int_{V_i} \frac{1}{a_e^2} [N]_i^T [N]_i dv \quad (15)$$

$$[m]_i = \int_{V_i} [B]_i^T [B]_i dv \quad (16)$$

$$[B]_i = \begin{Bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} \\ \frac{\partial}{\partial y} \\ \frac{\partial}{\partial z} \end{Bmatrix} [N]_i \quad (17)$$

여 에너지의 원리에 의하여 풍동안의 각 요소에 대해 다음과 같은 특성치 문제를 얻는다.

$$[m]_i \{p\}_i - \omega^2 [k]_i \{p\}_i = \{0\} \quad (18)$$

유한요소 공식화의 기본적인 방법으로 각각의 요소들을 조립하면, 다음과 같이 풍동안의 전체 영역에 대한 특성치 문제를 얻을 수 있다.

$$([M] - \omega^2 [K]) \{p\} = \{0\} \quad (19)$$

여기서 $[M]$ 은 전체 영역에 대한 질량 행렬이고, $[K]$ 는 전체 영역에 대한 강성 행렬이다. 본 연구에서 사용한 요소(element)의 형태는 2차원 8노드 등계수요소이다. 대부분의 실제적인 해석에서 등계수요소는 매우 효과적인 것으로 알려져 있다. 풍동 단면이 유체의 흐름방향에 대하여 일정하다고 가정하면 풍동공진 현상을 해석하기 위하여 2차원 요소로 충분하다.

4. 결과 및 고찰

4.1 2차원 8-노드 등계수요소의 수렴도

적절한 형상 함수를 갖는 등계수요소는 유한요소 해석에서 요구되는 수렴 조건인 compatibility와 completeness를 만족한다.

이 절에서는, 유한요소의 수렴도를 조사하기 위하여, 슬롯이 닫힌 원형 풍동에 대한 공진 진동수를 구하여 해석해와 비교하였다. Fig. 3는 계산에 사용된 유한요소 mesh의 형태이다. Fig. 4에서 보

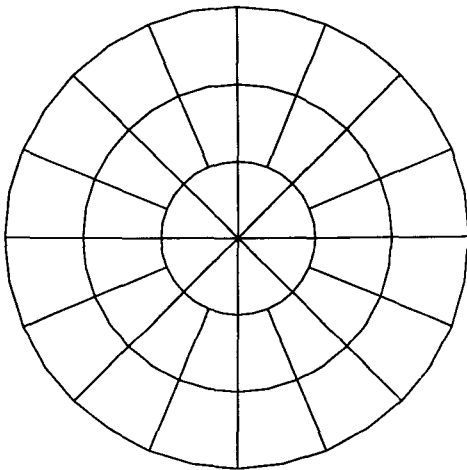


Fig. 3 Finite element mesh for circular wind tunnel

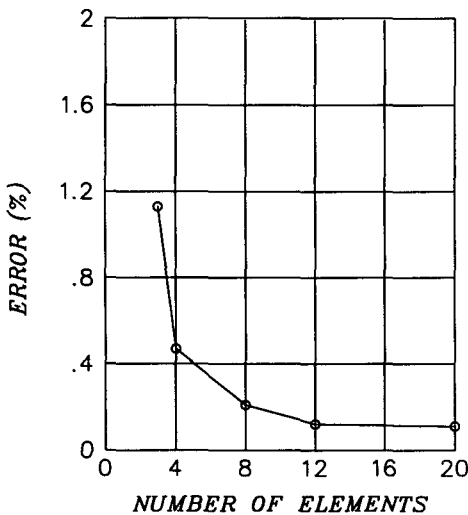


Fig. 4 Convergence rate of 2-D 8-node element results for circular cross section

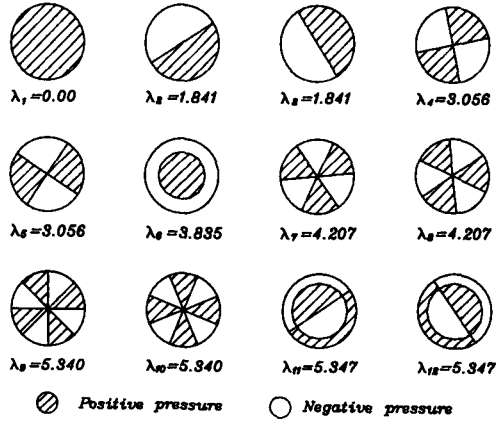


Fig. 5 Resonant frequencies and nodal lines for circular wind tunnel ($\lambda = \omega R / \beta a_0$)

듯이, 요소의 수가 증가할수록 계산결과는 해석해에 접근한다.

다음과 같은 무차원 공진 진동수를 정의하자.

$$\lambda = \frac{\omega R}{\beta a_0}$$

여기서 R 은 풍동의 반지름이고, a_0 는 유체의 음속이다. 참고문헌 (12)로부터 λ 의 해석해는 j'_{mn} 으로 주어진다. 여기서 j'_{mn} 은 Bessel함수의 1차 도함수가 0이 되는 값들이다. m 은 반지름 방향의 절선 (node line)수이고, n 은 방위각 방향의 절선수이다. 슬롯이 닫힌 풍동에 대해서, 12개의 요소를 사용하여 계산한 첫번째 공진 진동수는 해석해와 대략 0.1%의 오차를 갖는다. 그림 5는 $R=1m$ 인 풍동에 대하여 40개의 유한요소를 사용하여 계산한 공진 모드들이다. 이 그림은 높은 모드 (higher mode)의 노드 모양도 정확히 나타내고 있다.

4.2 슬롯을 갖는 원형 풍동

많은 풍동은 모델과의 간섭 효과를 줄이기 위하여 풍동벽에 여러 개의 슬롯을 갖는다. 풍동의 공진 특성은 슬롯에 의하여 영향을 받는다고 알려져 있다^(7,8). 이절에서는 슬롯을 갖는 원형 풍동의 공진 특성을 연구한다.

(1) 한 개의 슬롯을 갖는 원형 풍동

Fig. 6과 같이 풍동의 위와 아래에 각각 한개의 슬롯을 갖는 풍동을 고려한다. 슬롯의 폭은 d 이고, 풍동의 반지름은 R 이다. 이 때 다음과 같은 슬롯의 열린비 (open area ratio) e 를 정의한다.

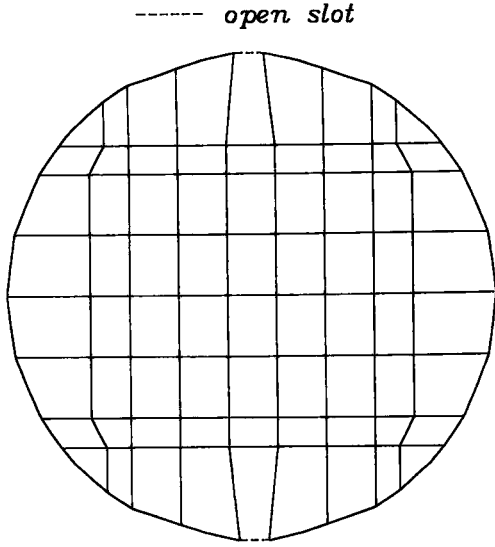


Fig. 6 Finite element mesh for circular wind tunnel with one slot each on top and bottom ($R=1m$)

$$e = \frac{2d}{\pi R}$$

이와 같이 열린비 e 를 정의할 때, $e=100\%$ 는 풍동의 전체 둘레에서 절반이 열려있음을 의미한다. 슬롯을 가진 풍동의 공진 특성은 슬롯에서 $P=0$ 이라는 경계조건을 적용함으로써 구할 수 있다. Fig. 7에 슬롯의 열린비가 2.55%일때 무차원 공진 진동수(λ)와 절선(node line)이 주어져 있다. 첫번째 진동수(λ_1)는 풍동의 수직 중심선과 수평 중심선에 대칭인 모드에 해당한다. 두번째 진동수(λ_2)는 풍동의 수직 중심선에 절선(node line)을 가지는 수평진동 모드에 해당한다. 만약에 풍동안에 모델이 풍동의 중심선에 수평으로 설치된다면, 첫번째 모드와 두번째 수평진동 모드는 모델의 진동과 간섭(coupling)하지 않기 때문에 이 모드에 해당하는 공진 진동수는 중요하지 않다. 세번째 진동수(λ_3)는 풍동의 수평 중심선에 절선(node line)을 갖는 수직진동 모드에 해당한다. 풍동의 중심에 날개가 수평으로 설치될 경우에 수직진동 모드는 모델과 심한 간섭(coupling)을 일으킴으로 수직진동 모드에 해당하는 공진 진동수는 매우 중요하다.

Fig. 8은 열린비에 따른 공진 진동수의 변화를 보인다. 계산에 사용된 유한요소수의 수는 72개이다. 이 그림을 살펴보면, 슬롯의 열린비가 증가할수록 풍동의 공진 진동수는 증가하고 있다. 왜냐하면,

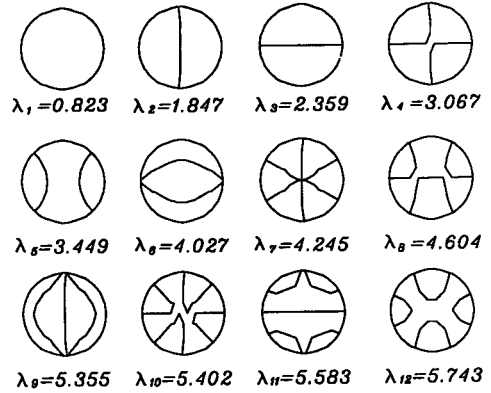


Fig. 7 Resonant frequencies and nodal lines for circular wind tunnel with one slot each on top and bottom ($\lambda = \omega R / \beta a_0$, $e = 2.55\%$)

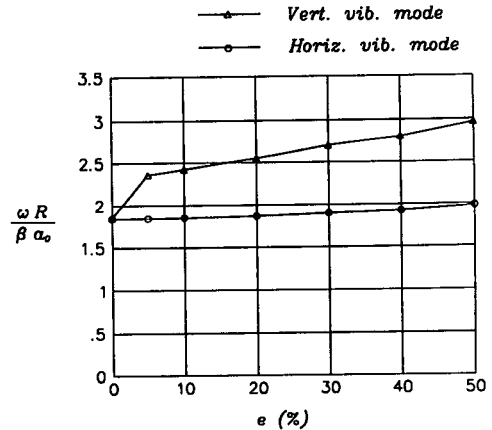


Fig. 8 Resonant frequencies vs. open area ration for circular wind tunnel with one slot each on top and bottom

슬롯의 경계조건이 풍동내의 음향진동을 제한하기 때문이다. 전반적으로, 수직진동 모드에 대한 공진 진동수가 수평진동 모드에 대한 공진 진동수보다 더 높아지는데 이는 슬롯의 열린 정도가 수직진동 모드에 직접 영향을 미쳐 수직진동 모드의 공진 진동수를 상승시키기 때문이다. 이 그림에서 보듯이, 수평진동 모드에 대한 공진 진동수는 슬롯의 열린비가 10%까지 거의 일정하다. 왜냐하면, Fig. 6에서 보듯이, 슬롯이 풍동의 위와 아래의 양극점에 대칭으로 위치하여 수평진동 모드에 거의 영향을 미치지 않기 때문이다. 만약에 슬롯이 단혀 있다면 슬롯의 영향이 없으므로 수평진동 모드와 수직진동

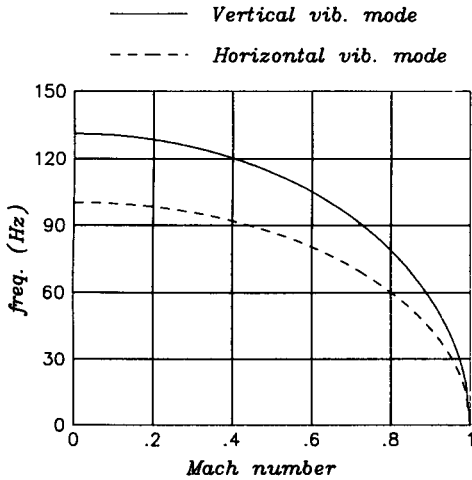


Fig. 9 Mach number vs. frequencies for circular wind tunnel with one slot each on top and bottom ($e=10\%$)

모드에 대한 공진 진동수는 같아진다(Fig. 5). 실제 운용 중인 풍동의 경우 슬롯의 열린면적비는 5%~10% 정도이나, 적절한 열린면적비는 풍동의 공진 특성 및 풍동내의 흐름이 슬롯을 통과하는 정도등의 영향을 함께 고려하여 결정해야 하리라고 생각된다. Fig. 9는 풍동안의 흐름속도가 공진진동수에 미치는 영향을 보인다. 이 그림에서 보듯이, 모든 진동수는 흐름의 마하수가 증가함에 따라 감

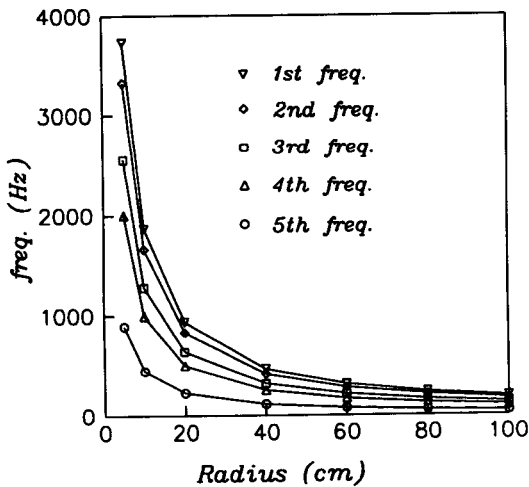


Fig. 10 Resonant frequencies vs. radius of circular wind tunnel with one slot each on top and bottom ($e=2.55\%$)

소한다. 이런 현상은 다음과 같이 설명할 수 있다. 지배 방정식은 식 (6)의 파동 방정식으로 주어지는데, 풍동 단면 내에서의 유효음속 (a_e)은 식 (7)과 같이 $a_0\sqrt{1-M^2}$ 으로 주어지며 마하수가 증가함에 따라 감소한다. 따라서 풍동 단면내에서의 공진진동수는 마하수가 증가함에 따라 감소하게 된다. 마하수가 1보다 커지면 식 (7)의 유효음속이 음수가 되어 식 (6)의 지배 방정식은 이미 파동 방정식이 되지 않는다. 따라서 마하수가 1보다 더 큰 경우에는 음파에 의한 공진 현상은 발생하지 않는다.

Fig. 5와 Fig. 7에서 보듯이, 슬롯이 열린 풍동과 닫힌 풍동의 공진 모드는 첫번째부터 네번째까지의 모드는 서로 같은 모드이며 다섯번째 모드에서부터 현저한 차이를 나타낸다. 서로 같은 모드를 비교하여 보면, 슬롯이 있는 경우의 진동수가 슬롯의 영향으로 더 높은 값을 가짐을 알 수 있다. Fig. 10에서 보듯이, 슬롯을 갖는 풍동의 공진 진동수는 반지름 R 에 반비례하는 경향을 보인다. 이런 특성은 슬롯이 닫힌 경우와 같다.

(2) 세 개의 슬롯을 갖는 원형 풍동

풍동의 위와 아래에 각각 세 개의 슬롯을 갖는 원형 풍동의 공진 특성을 연구하기 위하여 Fig. 11과 같은 유한요소 mesh를 사용한다. 이 경우에 열

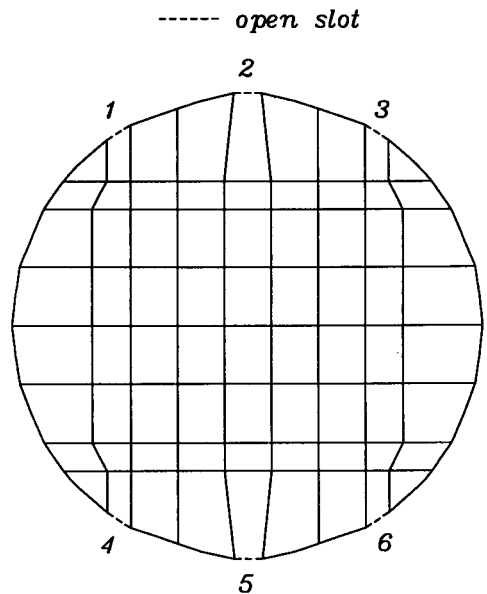


Fig. 11 Finite element mesh for circular wind tunnel with three slots each on top and bottom ($R=1m$)

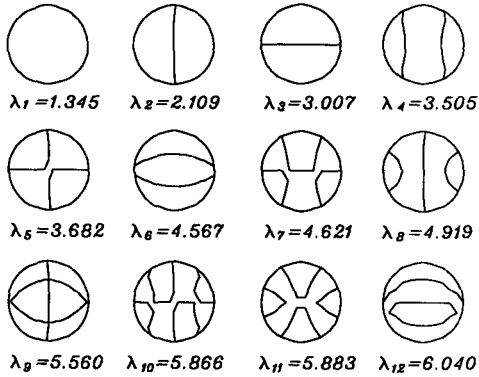


Fig. 12 Resonant frequencies and nodal lines for circular wind tunnel with three slots each on top and bottom ($\lambda = \omega R / \beta a_0$, $e = 7.64\%$)

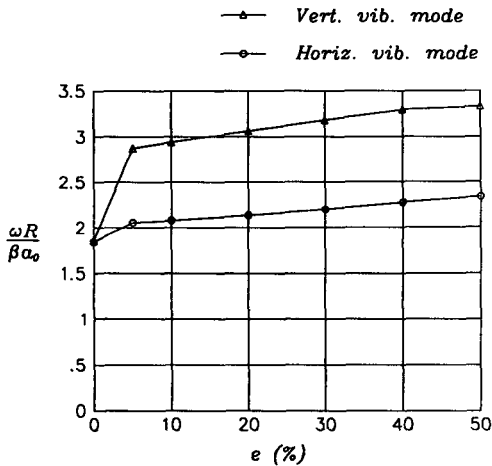
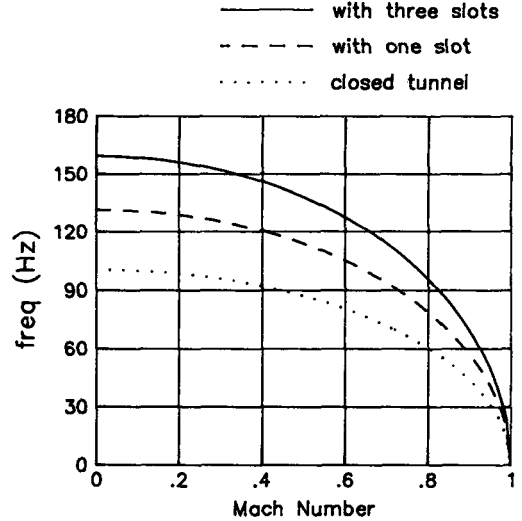


Fig. 13 Resonant frequencies vs. open area ratio for circular wind tunnel with three slots each on top and bottom

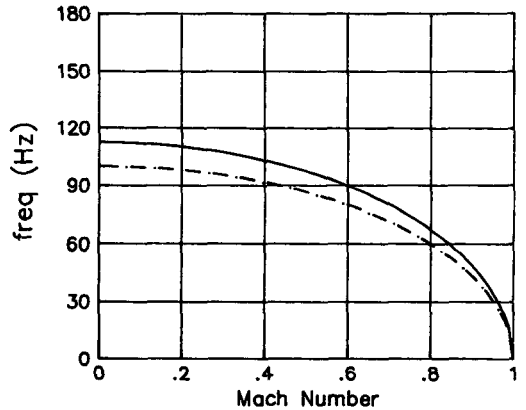
린면적비(open area ratio) e 는 다음과 같이 정의한다.

$$e = \frac{6d}{\pi R}$$

Fig. 12에 풍동의 열린비가 7.64%일때 무차원 공진 진동수와 절선이 주어져 있다. 슬롯이 한 개인 풍동과 같이, 수직 진동 모드는 풍동의 중심에 수평으로 설치된 모델과 강한 간섭효과(coupling effect)를 갖는다. 그래서, 수직진동 모드에 해당하는 공진 진동수는 매우 중요하다. Fig. 7과 Fig. 12를 비교해 보면 풍동의 공진 모드는 네번째 모드에서부터 다른 양상을 보임을 알 수 있다. 이 고찰



(a) Vertical vib. mode



(b) Horizontal vib. mode

Fig. 14 Mach number vs. frequencies for circular wind tunnels with one and three slots($e = 10\%$)

로, 풍동의 공진 모드는 슬롯의 갯수와 위치에 영향을 받음을 알 수 있다. Fig. 8과 Fig. 13으로부터 풍동의 공진 진동수는 슬롯의 열린비가 증가함에 따라 증가하고, 슬롯의 갯수와 위치에도 영향을 받음을 알 수 있다. 이 두 그림을 잘 비교해 보면, 슬롯이 열려진 정도에 대하여 수직 진동 모드는 비슷한 경향을 보인다. 그러나, 수평 진동 모드는, 슬롯이 세 개인 풍동에서, 슬롯에 의해 더 많은 영향을 받고 있다. 왜냐하면, Fig. 11과 같은 풍동에서 슬롯 1, 3, 4, 6은 수직 진동 모드 뿐만 아니라 수평진동 모드에도 영향을 미치기 때문이다. 이런 특성은 직사각형 단면을 갖는 풍동에 대한 공진특

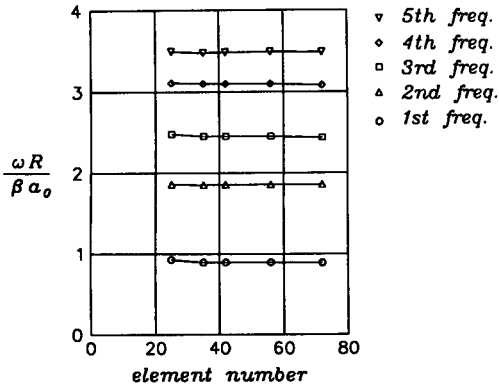


Fig. 15 Convergence rate for circular wind tunnel with one slot each on top and bottom ($e=2$, 55%)

성과 다른 점이다⁽⁸⁾. Fig. 14는 슬롯의 열린비가 10% 일때의 공진 진동수를 나타낸 것으로, 점선은 슬롯이 닫힌 경우에 대한 해석결과이고, 파선 (dashed line)은 슬롯이 한 개인 경우의 해석 결과이며 실선은 슬롯이 세 개인 경우의 해석 결과이다. 이 그림에서 보듯이, 슬롯이 세 개인 풍동의 공진 진동수가 슬롯이 한 개인 공진 진동수보다 더 크다. 따라서, 풍동의 공진 진동수는 슬롯의 열린비가 같더라도 슬롯의 갯수와 위치에 크게 영향을 받음을 알 수 있다.

Fig. 15에서 보듯이, 슬롯을 갖는 원형 풍동에 대해서도 2차원 8-노드(2차) 등계수요소는 선형 요소에 비하여 매우 빠른 수렴도를 보인다⁽⁸⁾. 왜냐하면, 선형 요소보다는 2차 요소가 풍동 단면의 모양 및 변수의 값을 더 정확히 근사화할 수 있기 때문이다. 같은 정확도를 가지고 풍동의 공진 특성을 해석하기 위하여, 슬롯이 열린 풍동이 슬롯이 닫힌 풍동보다 더 많은 유한요소가 필요하다.

5. 결 론

본 연구에서는, 유한요소법을 사용하여, 여러 개의 슬롯을 갖는 2차원 원형 풍동의 공진 특성을 해석하여 다음과 같이 결론을 얻을 수 있다.

(1) 슬롯을 갖는 2차원 원형 풍동에 대하여, 슬롯의 열린비와 갯수 그리고 흐름의 마하수에 관계 없이, 수직 진동 모드에 대한 공진 진동수가 수평 진동 모드에 대한 공진 진동수보다 크다.

(2) 수평 진동 모드에 해당하는 공진 진동수는 슬롯이 한 개인 경우에 슬롯이 영향이 매우 적으며, 슬롯이 세개인 경우에는 슬롯의 영향이 보다 커지는 것을 알 수 있다.

(3) 풍동의 공진 모드는 높은 모드(higher mode)에서 슬롯의 갯수에 영향을 받는다. 즉, 본 연구에서와 같이 슬롯이 한개와 세개인 풍동의 경우는 네번째 이상의 모드에서 서로 다른 모드 형상이 나타난다.

(4) 2차원 원형 풍동의 경우, 일정한 열린비에 대하여, 슬롯이 세개인 경우가 슬롯이 한개인 경우보다 수직 및 수평 진동 모드에 대한 공진 진동수가 크다.

(5) 슬롯을 갖는 원형 풍동의 모든 공진 진동수는 흐름의 마하수가 증가할수록 감소한다.

참 고 문 헌

- (1) Runyan, H.L., Watkins, C.E., 1953, "Considerations on the Effect of Wind-Tunnel Walls on Oscillating Air Forces for Two-Dimensional Subsonic Compressible Flow", NACA Rep. 1150.
- (2) Widmayer, E., Cleeverson, S.A., and Leadbetter, S. A. 1958, "Some Measurements of Aerodynamic Forces and Moments at Subsonic Speeds on a Rectangular Wing of Aspect Ratio 2 Oscillating About the Midchord," NACA TN 4240.
- (3) Acum, W.E.A., 1962, "A Simplified Approach to the Phenomenon of Wind-Tunnel Resonance", A.R. C. Reports and Memoranda No. 3371.
- (4) Mabey, D.G., 1978, "The Resonance Frequencies of Ventilated Wind Tunnel", A.R.C. Reports and Memoranda No. 3841.
- (5) Gladweel, G.M.L. and Zimmermann, G., 1966. "On Energy and Complementary Energy Formulations of Acoustinc and Structural Vibration Problems", Journal of sound and vibration, 3(3), 233~241.
- (6) Gladwell, G.M.L., 1966, "A Variation Formulation of Damped Acousto-Structural Vibration Problems", 4(2), 172~186.
- (7) Lee, I., 1989, "Resonance Prediction for Open and Closed Wind-Tunnel by the Finite Element Method", AIAA Journal, Vol 27, No. 4, pp. 391~398.
- (8) Lee, I., 1988, "Plenum Chamber Effect on Wind-Tunnel Resonance by the Finite-Element Method", AIAA Journal, Vol 26, No. 9, pp. 1087~1093.
- (9) Craggs, A., 1972, "The use of Simple Three-

- Dimensional Acoustic Finite Elements for Determining the Natural Modes and Frequencies of Complex Shapes Enclosures”, *Journal of Sound and Vibration*, 23(3), pp. 331~339.
- (10) Shuku, T. and Ishihara, K., 1973, “The Analysis of the Acoustic Field in Irregularly Shaped Rooms by the Finite Element Method”, *Journal of Sound and Vibration*, 29(1), pp. 67~76.
- (11) Petyt, M., Lea, J. and Koopmann, G.H., 1976, “A Finite Element Method for Determining the Acoustic Modes of Irregular Shapes Cavities”, *Journal of Sound and Vibration*, 45(4), pp. 495~502.
- (12) Kinsler, L.E., Frey, A.R., Coppens, A.B. and Sanders, J.V., 1982, “Fundamentals of Acoustics”, John Wiley & Sons Inc.