

〈論 文〉

# 3차원 원형 풍동의 공진 특성

백기영\* · 이 인\*\* · 신현동\*\*\*

(1990년 2월 15일 접수)

## Resonance Characteristics for 3-Dimensional Circular Wind Tunnel

Ki-Young Baik, In Lee and Hyun Dong Shin

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

### Abstract

A finite element method is used for analyzing the resonant characteristics of three-dimensional wind tunnel with circular cross section. The resonant frequencies of wind tunnel is nearly constant in Mach number range of 0.0~0.2. The resonant frequencies and modes of three-dimensional low speed wind tunnel have been calculated. The 20-node isoparametric element gives accurate results compared with the experimental results.

### 기 호 설 명

- $a_0$  : 음속
- [B] : 방정식 (14)에 정의된 행렬
- $D(z)$  : 3차원 원형 풍동의 지름
- $f$  : 진동수 (Hz)
- $F$  : 여 계에 대한 Variational functional
- [k] : 요소 강성 행렬
- [K] : 전체계에 대한 강성 행렬
- $L$  : 3차원 풍동의 길이
- $M$  : 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)
- $P_0$  : 정상 상태의 압력
- {p} : 절점 압력의 열 벡터
- $t$  : 시간

- $\bar{V}$  : 3차원 풍동의 속도
- $x, y, z$  : 직교 좌표계
- $\omega$  : 각 진동수
- $\xi, \eta, \zeta$  : 요소 좌표계
- $\lambda'$  : 무차원 공진 진동수

### 1. 서 론

풍동에서 항공기 날개의 플러터 및 비정상 날개에 작용하는 공기력 측정과 같은 동적인 풍동 실험의 결과는, 날개의 진동수가 풍동의 공진 진동수로 접근할 때, 풍동의 공진 현상에 의하여 많은 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. Runyan 등<sup>(1)</sup>은 진동하는 모델에 미치는 힘을 측정할 때 나타나는 풍동의 공진 현상을 2차원 날개의 밀폐된 풍동에 대해 이론적으로 해석했다. Widmayer<sup>(2)</sup>는 사각 날개에 작용하는 공기역학적인 힘과 모우멘트를 측정하는 실험에서, 날개의 진동수가 풍동의 공

\*한국과학기술원 항공공학과  
 \*\*정회원, 한국과학기술원 항공공학과  
 \*\*\*정회원, 한국과학기술원 기계공학과

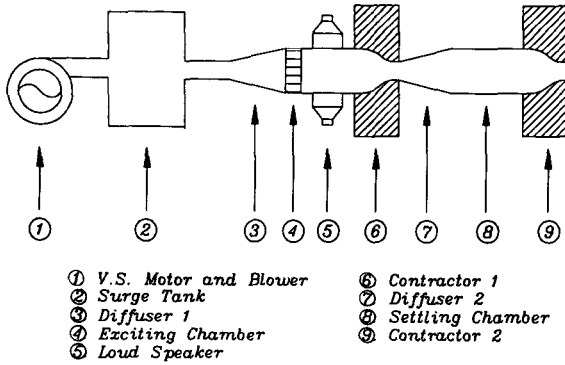


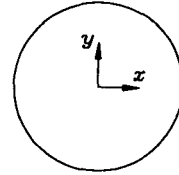
Fig. 1 Schematic diagram of 3-D wind-tunnel

진 진동수로 접근할 때 많은 오차를 감지하였다. 유한요소법은 구조 문제나 구조물의 진동해석에 주로 사용되어 왔으나 Gladwell 등<sup>(3,4)</sup>이 음향과 구조진동계에 대한 에너지 및 여 에너지 (complementary energy)에 대한 식을 유도하면서, 음향 문제나 음향과 구조물간의 간섭 문제에도 많이 적용되고 있다. Craggs<sup>(5)</sup>는 3차원 선형 요소를 사용하여 복잡한 형태의 밀폐된 공간에 대한 공진 진동수와 모우드를 구하였다. Shuku와 Ishihara<sup>(6)</sup>는 삼각형 유한요소를 사용하여 일반적인 형태를 갖는 공간안의 음장(acoustic field)을 해석했다. Petyt, Lea와 Koopmann<sup>(7)</sup>은 3차원 20-노드 등계수 요소(isoparametric element)를 사용하여 임의의 형태를 가지는 공동(cavity)에 대한 공진 현상을 해석하였다. Lee<sup>(8,9)</sup>는 유한요소법을 사용하여 4각형 및 8각형 풍동에 대한 공진 특성을 고찰하였다.

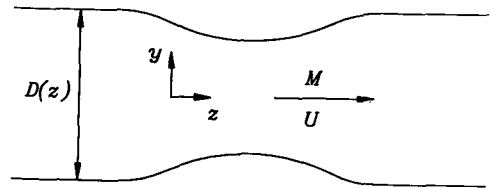
종래의 연구는 슬롯을 갖는 2차원 풍동이나 밀폐된 3차원 공간에 대한 공진 특성을 구하였으나, 본 연구에서는 Fig. 1과 같은 열린 경계(open boundary)를 갖는 일반적인 형태의 3차원 풍동에 대한 공진 특성을 구하여 이를 실험과 비교한다. 이런 풍동에 공진 진동수와 일치하는 규칙적인 가진을 주면, 유동 특성은 현저하게 변하게 된다. 일반적으로, 이러한 임의의 형태를 갖는 풍동의 공진 진동수와 모드는 이론적인 방법으로 예측하기는 매우 힘들다. 이런 경우에 유한요소법은 매우 유용한 방법이다.

2. 공식화와 유한요소법

참고문헌 (10)에 의하면 흐름의 마하수가 0.2보



(a) Cross section of wind tunnel



(b) Side view of wind tunnel

Fig. 2 Coordinate system of 3-D wind tunnel

다 작은 경우에 2차원 풍동의 공진진동수는 거의 일정하다. 이러한 결과에 의거하여 3차원 저속 풍동에 대한 공진 특성을 연구한다.

2.1 운동 방정식과 경계조건

본 절에서는 Fig. 1과 같은 3차원 저속 풍동의 공진 특성을 연구하고자 한다. 이 풍동의 공진 특성의 실험은 Kim<sup>(11)</sup>에 의해 수행되었으며, 마하수는 0.04이하이었다. 따라서, 유한요소법에 의한 계산 결과와 실험 결과를 비교해보고, 공진특성을 연구하는 것이 연구의 동기가 되었다. Fig. 2와 같이, 풍동의 단면이 유체의 흐름방향을 따라 변하는 복잡한 형태의 풍동에 대하여, 풍동의 공진 진동수와 모우드는 2차원으로 해석할 수 없다. 그러나, 일반적인 3차원 흐름을 고려한 풍동의 공진 특성은 매우 복잡함으로 다음과 같은 과정을 통해 단순화한다.

교란된 압력은 평형 상태의 값에 비해서 작다고 가정하며, 유체의 점성 효과는 없다고 가정한다. Fig. 2와 같이 직교 좌표계를 잡을 때, 풍동안의 음장(acoustic field)은 다음과 같은 파동 방정식으로 지배 받는다<sup>(12)</sup>.

$$\left(\frac{\partial}{\partial t} + \nabla \cdot \nabla\right)^2 p = a_0^2 \nabla^2 p \tag{1}$$

속도는 다음과 같이 z방향으로만 존재한다고 가정하면,

$$\vec{V} = V\vec{k} \quad (2)$$

방정식 (1)은 다음과 같이 전개된다.

$$\left( \frac{\partial^2}{\partial t^2} + 2V \frac{\partial^2}{\partial t \partial z} + V^2 \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) p = a_0^2 \nabla^2 p \quad (3)$$

방정식 (3)을 무차원하기 위해서 다음과 같은 무차원 변수를 정의한다.

$$x^* = \frac{x}{L}, \quad y^* = \frac{y}{L}, \quad z^* = \frac{z}{L}, \quad p^* = \frac{p}{P_0},$$

$$t^* = \frac{a_0}{L} t \quad (4)$$

여기서,  $L$ 은 풍동의 길이,  $P_0$ 는 평형상태의 압력이고,  $a_0$ 는 유체의 음속이다.

식 (4)를 식 (3)에 대입하여 정리하면 다음과 같다.

$$\frac{\partial^2 p^*}{\partial t^{*2}} + 2M \frac{\partial^2 p^*}{\partial z^* \partial t^*} + M^2 \frac{\partial^2 p^*}{\partial z^{*2}} = \nabla^2 p^* \quad (5)$$

여기서,  $M$ 은 흐름의 마하수이다.

흐름의 마하수  $M$ 이 충분히 작다고 가정한다면, 방정식 (5)의 두번째 항과 세번째항은 무시할 수 있다. 실제로 실험을 실시한 풍동내의 속도는 마하수가 0.04보다도 작은 영역이었다. 이러한 가정하에서, 방정식 (3)은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\frac{\partial}{\partial t} = a_0^2 \nabla^2 p \quad (6)$$

이 방정식은 3차원 저속 풍동에 대한 지배방정식이다. 음장의 성질들이 조화운동(harmonic motion)하에 있다면, 방정식 (6)은 다음과 같은 Helmholtz 방정식이 된다.

$$\nabla^2 p + \left( \frac{\omega}{a_0} \right)^2 p = 0 \quad (7)$$

여기서,  $a_0$ 는 유체의 음속이다. 이 방정식은 식 (1)에서 속도항이 없어진 방정식이다. 따라서, 마하수가 비교적 커지면 식 (7)은 부정확한 공진 진동수를 예측하게 된다. 3차원 저속 풍동에 대한 이러한 공식화(formulation)는 2차원 풍동의 공진 해석결과로부터 유추한 바와 잘 일치한다. 방정식 (7)은 3차원 저속 풍동에 대한 공진 특성을 해석하기 위하여 사용된다. 그리고, 경계조건은 다음과 같다.

$$\frac{\partial p}{\partial n} = 0 \quad \text{on the rigid boundary} \quad (8)$$

$$p = 0 \quad \text{on the open boundary}$$

### 2.2 유한요소법

변분법은 동력학, 구조역학, 그리고 연속체 역학 등에 폭넓게 사용되어 왔다. 이변분원리는 최근에 음향문제와 음향과 구조물간의 간섭 문제에 적용되고 있다<sup>(5~10)</sup>. Gladwell<sup>(3,4)</sup>은 음향과 구조진동계에 대한 에너지 및 여 에너지에 대한 식을 유도하였다. 본 연구에서는 풍동의 공진 현상을 해석하기 위한 유한요소법을 수식화하는데 여 에너지를 사용할 것이다.

풍동안의 적절한 범함수는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$F = \frac{1}{2\rho a_0^2} \int_v p^2 dv - \frac{1}{2\rho \omega^2} \int_v (\nabla p)^2 dv \quad (9)$$

식 (9)에 정지 여 에너지원리(stationary complementary energy principle)<sup>(8)</sup>를 적용하면 식 (7)과 식 (8)에 있는 지배방정식과 경계조건을 얻을 수 있다. 따라서 식 (9)를 유한요소법을 수식화하는데 사용한다.

본 연구에서 사용된 유한요소는 Fig. 3과 같은 3차원 20-노드 등계수 요소이고, 이 요소내에서의 압력 분포는 다음과 같이 형상 함수의 행 벡터와 각 절점의 압력으로 이루어진 열 벡터에 의하여 근

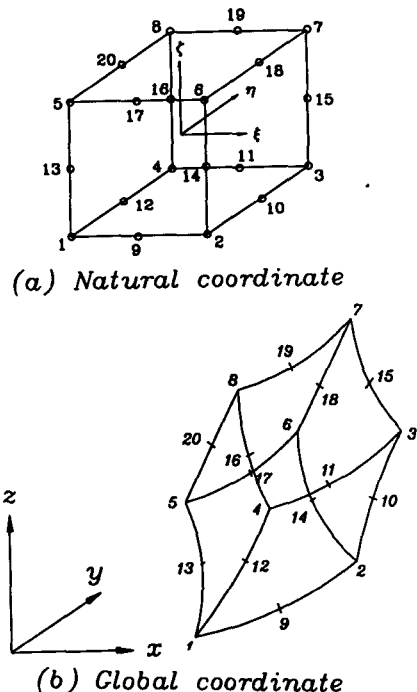


Fig. 3 Geometry of 20-node isoparametric element

사화시킬 수 있다.

$$p = [N]_i \{p\}_i \tag{10}$$

여기서,  $i=1\sim 8$ 일때의 형상 함수는

$$N_i = (1 + \xi_i \xi)(1 + \eta_i \eta)(1 + \zeta_i \zeta) \\ (\xi_i \xi + \eta_i \eta + \zeta_i \zeta - 2)/8$$

이고,  $i=9, 11, 17, 19$ 일때의 형상 함수는

$$N_i = (1 - \xi^2)(1 + \eta_i \eta)(1 + \zeta_i \zeta)/4$$

이고,  $i=10, 12, 18, 20$ 일때의 형상 함수는

$$N_i = (1 + \xi_i \xi)(1 - \eta^2)(1 + \zeta_i \zeta)/4$$

이고,  $i=13, 14, 15, 16$ 일때의 형상 함수는

$$N_i = (1 + \xi_i \xi)(1 + \eta_i \eta)(1 - \zeta^2)/4$$

식 (10)을 식 (9)에 대입하면 공동안의 각 요소에 대하여 다음 식을 얻는다.

$$F_i = \frac{1}{2\rho\omega^2} (\omega^2 \{p\}_i [k]_i \{p\}_i - \{p\}_i [m]_i \{p\}_i) \tag{11}$$

여기서

$$[k]_i = \int_{v_i} \frac{1}{a_0^2} [N]_i^T [N]_i dv \tag{12}$$

$$[m]_i = \int_{v_i} [B]_i^T [B]_i dv \tag{13}$$

$$[B]_i = \begin{Bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} \\ \frac{\partial}{\partial y} \\ \frac{\partial}{\partial z} \end{Bmatrix} [N]_i \tag{14}$$

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

$$[m]_i \{p\}_i - \omega^2 [k]_i \{p\}_i = \{0\} \tag{15}$$

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

$$([M] - \omega^2 [K]) \{p\} = \{0\} \tag{16}$$

여기서  $[M]$ 은 전체 영역에 대한 질량 행렬이고,  $[K]$ 는 전체 영역에 대한 강성 행렬이다.

### 3. 결과 및 토론

#### 3.1 3차원 20-노드 등계수 요소의 수렴도

이 절에서는, 3차원 20-노드 등계수 요소의 수렴

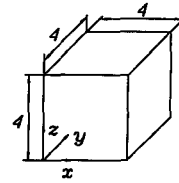


Fig. 4 Rectangular cavity

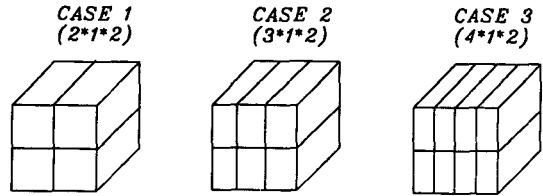


Fig. 5 Mesh configuration for rectangular cavity

도를 조사하기 위하여, Fig. 4와 같은 사각 공동의 공진 진동수를 구하여 해석해와 비교한다. 이 유한요소 해석에 사용된 mesh의 형태들을 Fig. 5에 도시하였다. 그리고, 계산된 결과는 Table 1에 수록하였으며, 이 계산치들을 다음과 같은 해석해<sup>(13)</sup>와 비교하였다.

$$\lambda' = \left(\frac{\omega}{a_0}\right)^2 = \left(\frac{1\pi}{L_x}\right)^2 + \left(\frac{m\pi}{L_y}\right)^2 \\ + \left(\frac{n\pi}{L_z}\right)^2 \tag{1, m, n=0, 1, 2, \dots}$$

여기서,  $L_x, L_y, L_z$ 은 공동의  $X, Y, Z$ 방향으로의

Table 1 Comparison of natural frequencies between finite element results and exact solution for a rectangular cavity

Mode	(2*1*2) Elements $\lambda' = \omega^2/a_0^2$	(3*1*2) Elements $\lambda' = \omega^2/a_0^2$	(4*1*2) Elements $\lambda' = \omega^2/a_0^2$	Exact solution $\lambda' = \omega^2/a_0^2$
1,0,0	0.621490	0.617826	0.617166	0.616850
1,1,0	1.24728	1.24060	1.23929	1.233701
1,1,1	1.99728	1.99060	1.98929	1.850550
2,0,0	3.00000	2.52145	2.48596	2.467401
2,1,0	3.62149	3.16547	3.11782	3.084251
2,1,1	4.37149	3.91547	3.86782	3.701101
2,2,0	5.25000	5.17500	5.14917	4.934802

Exact solution  $\lambda' = \omega^2/a_0^2 = (\ln/L_x)^2 + (m\pi/L_y)^2 + (n\pi/L_z)^2$

**Table 2** The effect of mode number on the error of the natural frequencies for a rectangular cavity

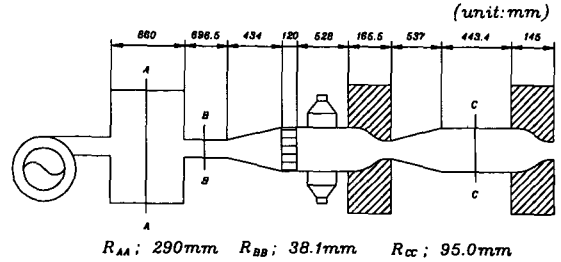
Mode	Exact	4*4*4*	Error(percent)
000	0.00000E+00	-0.24657E-14	—
001	0.61685E+00	0.61717E+00	0.050
110	0.12337E+01	0.12344E+01	0.054
111	0.18506E+01	0.185162E+01	0.057
200	0.24674E+01	0.24860E+01	0.750
210	0.30843E+01	0.31040E+01	0.640
211	0.37011E+01	0.37221E+01	0.570
220	0.49348E+01	0.49891E+01	1.100
221	0.55165E+01	0.56080E+01	1.680
300	0.55165E+01	0.57365E+01	3.990
310	0.61685E+01	0.63600E+01	3.100
311	0.67854E+01	0.69835E+01	2.920
222	0.74022E+01	0.75079E+01	1.430
320	0.80191E+01	0.83319E+01	3.900
321	0.86359E+01	0.89557E+01	3.700
400	0.98696E+01	0.10933E+02	10.78

길이이고,  $l, m, n$ 은 모드의 형태를 결정짓는 변수(parameter)이다. 이 도표로부터 요소의 빠른 수렴성을 알 수 있다. 그리고,  $(4 \times 4 \times 4)$  mesh의 유한요소 해석이 갖는 오차가 Table 2에 주어져 있다. 이 해석에서 사용된 유한요소의 갯수는 64개이다. 이 도표에서 보듯이, 사각 공동의 공진 진동수는 높은 모드(higher mode)까지 매우 잘 수렴하고 있다. 유한요소법을 사용하여 얻은 결과가 4%내로 수렴하기 위해서 절점으로 된 평면(nodal plane)사이에 적어도 하나 이상의 mesh가 있어야 한다.

### 3.2 원형 단면을 가지는 3차원 저속 풍동

본 연구에서 해석하고자 하는 풍동은 Fig. 1과 같은 송풍식 풍동이다. Kim은 이 풍동을 사용하여 주기적인 가진을 받는 원형제트의 유동특성에 대하여 연구하였다<sup>(11)</sup>. 이와 같은 풍동의 공진 진동수는 해석적인 방법으로 계산하기는 매우 힘들다. 이런 경우에 유한요소법은 매우 유용한 방법이 된다.

이 풍동은, Fig. 1에서 보는 바와 같이, 2개의 확산실, 2개의 수축부, 직경 19cm의 가진실, 정체실(settling chamber), surge tank와 유연한 호수(flexible hose)등으로 이루어져 있으며, 모든 단면은 원형이다. 이 풍동의 상세한 제원을 Fig. 6에



**Fig. 6** Side view of 3-D wind tunnel

도시하였다. 이와 같이 원형 단면을 갖는 복잡한 형태의 3차원 풍동에 대한 공진 특성은 2차원으로 해석할 수 없으므로, 본 연구에서는 3차원 20-노드 등계수 요소를 사용한다. 여기서 보간 함수는 2차식이 된다.

이 풍동은, 제트출구에서, 균일한 속도를 얻기 위하여 1차 확산실 뒷부분에 honeycomb구조를 가지고 있으며, 흐름에 가진을 주기 위하여 가진실에 여러 개의 작은 구멍이 있다. 유한요소 해석에서 이런 사항을 고려하는 것은 매우 어려우며, 고려할 경우에 전체 자유도수는 급증하게 된다. 이런 이유로, 본 연구에서는 honeycomb구조는 없다고 가정하고, 가진실의 작은 구멍들은 닫힌 것으로 가정한다. 또한, 제트출구에서의 압력과 surge tank입구 부분의 압력은 대기압으로 가정한다.

이런 가정에서 유한요소 해석에 사용된 mesh의 형태를 Fig. 7에 도시하였다. Fig. 7(a)는 mesh의 형태를 3차원으로 설명한 것이고, Fig. 7(b)는 mesh의 형태를 단면별로 도시한 것이며, Fig. 7(c)는 mesh의 형태를 측면에서 본 것이다. 계산에 사용된 요소의 갯수는 124개이며, 총 절점수는 715이다. 실제 풍동은 z방향으로 복잡한 모양을 가지고 있고 Cray슈퍼 컴퓨터의 용량에 제한이 있기 때문에, z방향으로의 mesh수가 유한요소해에 의한 계산결과에 미치는 영향을 알아보기 위하여 Fig. 8과 같은 실린더를 생각하였다. z방향의 mesh수가 8개이면 유한요소법을 사용한 계산결과는 충분히 수렴함을 알 수 있다.

이런 가정하에서 계산된 풍동의 공진 진동수는 38.44, 77.65, 98.83, 164.52Hz등이다. Kim은 Fig. 1과 같이 주어진 풍동에서 단면 5에 스피커를 부착하여 주기적인 가진을 가함으로서 풍동 출구에서의 유동특성을 고찰하여 공진현상이 유동특성에 미치는 영향을 연구하였다. 실험에서 얻어진 공진

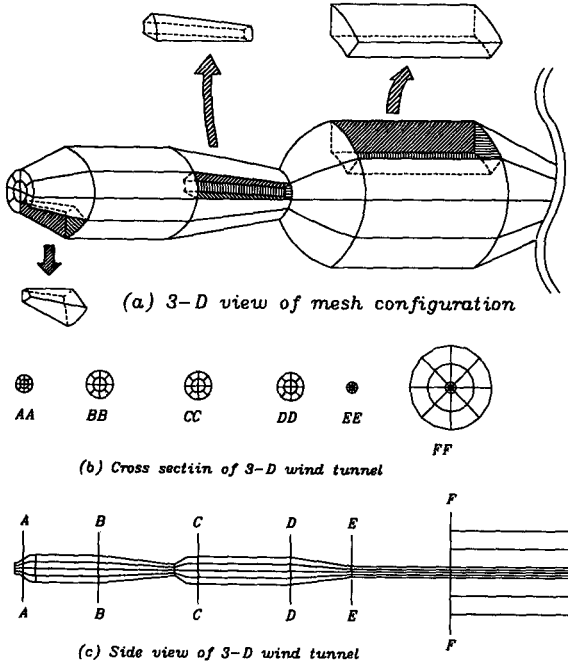


Fig. 7 Mesh configuration of 3-D wind tunnel

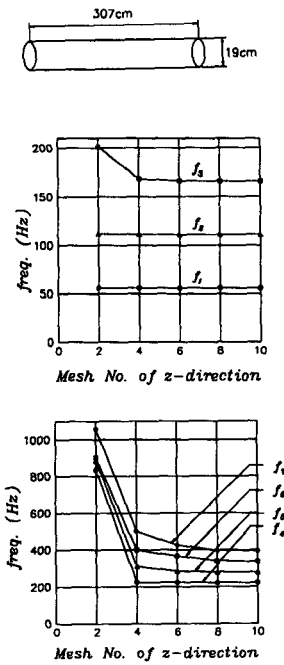


Fig. 8 Convergence rate of natural frequencies for circular cylinder

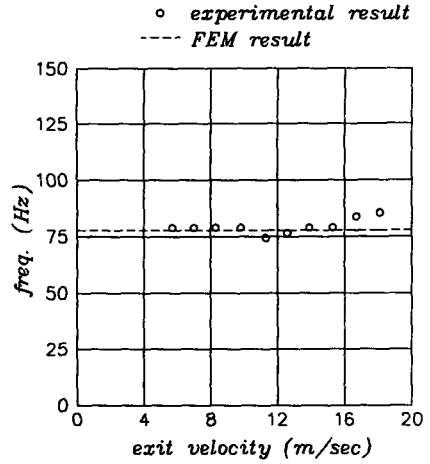


Fig. 9 Natural frequencies of 3-D wind tunnel

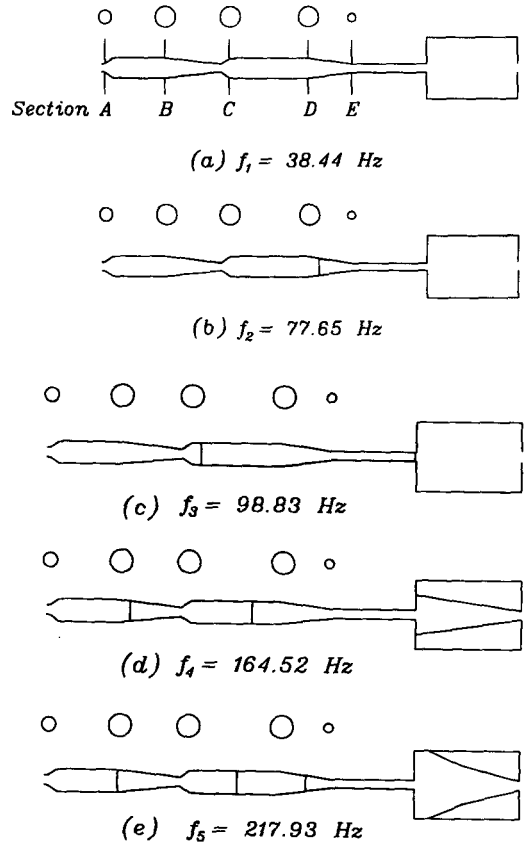


Fig. 10 Natural frequencies and modes for 3-D wind tunnel with two open boundaries

진동수는 그림 9에 주어져 있는데 이 진동수는 유한요소 결과에서 얻어진 진동 모우드의 두번째 모드에 해당된다. 단면 5에 있는 스피커는 두번째 모드를 매우 효과적으로 가진함을 알 수 있다. 앞으로 실험을 통하여 스피커에 의한 가진이 다른 모드에 미치는 영향을 연구하는 것이 바람직하다.

풍동의 공진 진동수는 제트 출구 속도가 16.4m/sec이하의 저속 흐름에 대하여 대략1.6%의 오차를 갖는다. 속도가 16.4m/sec 이상에서는 오차가 약간 증가하는데, 이는 식 (5)에서 마하수가 충분히 작다고 가정하였기 때문에 유한요소 결과치는 실험치와 오차가 커지게 된다.

이 풍동에 대한 공진 모드를 Fig. 10에 도시하였다. 풍동 내부의 실선은 노드선으로서 이곳에서는 교란 압력이 영이 된다. 매우 흥미있는 현상은 풍동의 작은 공진진동수에 일치하는 모드 형태는 노드선이 유체의 흐름 방향에 수직하다는 것이다. 이는 풍동 단면의 길이가 풍동의 길이에 비해 상당히 작기 때문이다. 3차원 풍동의 단면이  $z$ 축(유동의 흐름축)에 따라서 심하게 변하는 경우 3차원 유한요소 모델이 반드시 필요하다.

풍동(Fig. 1)의 단면 6과 7에 수축 및 확산부 존재하는데, 만약 수축 및 확산부의 단면이 일정하다면 풍동 내의 체적이 커지기 때문에 풍동공진수는 작아질 것으로 예측된다. 본 연구에서 Fig. 1과 같은 3차원 풍동의 공진 특성을 해석하기 위하여 사용한 공식화(formulation)와 모델링(modeling)은 흐름의 속도가 16.4m/sec이하의 저속 흐름에 대하여 매우 훌륭함을 알 수 있다. 또한,  $z$ 방향에 수직한 nodal plane만을 갖는 모드에 대한 공진 진동수는 Honeycomb 구조의 영향이 매우 적음을 알 수 있다.

#### 4. 결 론

(1) 본 연구에서 사용한 20-노드 등계수요소는 저속 흐름에 대하여 3차원 풍동의 공진 진동수를 정확히 예측할 수 있었으며 실험결과와 비교적 잘 일치하였다.

(2) 본 연구의 해석 방법은 유체의 속도가 매우 증가하면 마하수의 영향이 커지기 때문에, 지배방정식은 Helmholtz 방정식이 아닌 마하수의 영향이 고려된 식 (7)를 사용하여야 한다.

(3) 본 연구에서 사용된 풍동은 유체의 단면이

흐름 방향의 길이에 비해 길기 때문에 적은 진동수에 일치하는 모드는 유체의 흐름 방향에 수직인 노드선을 갖는다.

(4) 풍동내에 설치된 Honeycomb 구조물은 유체의 흐름방향에 평행하기 때문에, 흐름 방향에 수직인 노드선을 갖는 기본공진 특성에 큰영향을 미치지 않는다.

#### 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", NACARep. 1150.
- (2) Widmayer, E., Clevevson, 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) Gladwell, G.W.L. and Zimmernann, G., 1966, "On Energy and Complementary Energy Formulations of Acoustic and Structural Vibration Problems", Journal of Sound and Vibration, 3(3), pp. 233~241.
- (4) Gladwell, G.W.L., 1966, "A Variation Formulation of Damped Acousto-Structural Vibration Problems", 4(2), pp. 172~186.
- (5) 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.
- (6) 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.
- (7) Petyt, M., Lea, J. and Koopmann, G.H., 1976, "A Finite Element Method for Determining the Acoustic Modes of Irregular Shapes Cavities", Journal of Soud and Vibration, 45(4), pp. 495~502.
- (8) 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.
- (9) Lee, I., 1989, "Plenum Chamber Effect on Wind-Tunnel Resonance by the Finite-Element Method", AIAA Journal, Vol. 26, No. 9, pp. 1087~1093.
- (10) 백기영, 1990, "유한요소법을 사용한 2차원 및 3차원 원형 풍동의 공진해석", 석사학위논문, 한국과

- 과학기술원.
- (11) 김명배, 1989, "주기적인 가진을 받는 원형제트의 유동특성에 관한 기초적 연구", 석사학위논문, 한국과학기술원.
- (12) Morse, P.M., 1968, "Theoretical Acoustics". McGraw-Hill Inc.
- (13) Kinsler, L.E., Frey, A.R., Coppens, A.B. Coppens, A.B. and Sanders, J.V., 1982, "Fundermentals of Acoustics", John Wiley & Sons Inc.