

<論 文>

# 음향 인텐시티법을 이용한 테니스 라켓의 동특성에 관한 연구

오재응\* · 이유엽\*\* · 염성하\*\*\*

(1986년 1월 11일 접수)

## A Study on the Identification of Dynamic Characteristics of Tennis Racket by Acoustic Intensity Method

Jae Eung Oh, You Yub Lee and Sung Ha Yum

**Key Words;** Acoustic Intensity Method (음향 인텐시티법), Sound Pressure(음압), Vibration Characteristics(진동특성)

### Abstract

The acoustic intensity in the very near field of a vibrating surface reveals information about the location of sound sources and sinks. A system model of tennis racket was developed from simultaneous measurement of excitation force, surface vibration and the near field sound pressure. The characteristics of structural dynamics were obtained by standard experimental modal analysis techniques while the sound radiation characteristics were determined by estimating the acoustic intensity. In this paper, the information about vibration behaviour was obtained by acoustic intensity method and some experiments for verification were carried out. Close correlation was found between experimentally determined acoustic intensity and vibration mode patterns of the tennis racket.

### 1. 서 론

테니스 플레이어에 있어서 임팩트는 플레이의 우열을 결정하는 것 뿐만아니라 플레이어 자신의 신체에 크게 영향을 미치는 점으로 보아 플레이어에게는 대단히 중요한 요소이다. 최근 테니스 플레이어 사이에 문제가 되고 있는 테니스 엘보우라고 불리는 질환의 발생은 임팩트 때 라켓에 발생하는 진동이 팔에 전달되는 것이 하나의 중요한 원인으로 알려져 왔다. 그러나 임팩트순간의 물리적 현상은 정확히 해명되어 있지 않은

실정이다. 이와같이 임팩트 순간의 현상을 해명하는 것은 테니스 엘보우의 예방, 플레이어의 숙달법 및 테니스 라켓 설계·제조단계에서 상당히 유효하다고 생각되어 진다.

지금까지 테니스 라켓에 관한 동특성의 해석은 주로 실험적인 방법에 의해 연구되어 왔다<sup>(1-3)</sup>. 특히 宮下<sup>(1)</sup>에 의해서는 실제 플레이 중에 볼과 라켓의 속도 관계 등이 측정되었으며 Mclaughlin<sup>(4)</sup> 등에 의해서는 정지된 라켓에 볼을 충돌시킬때 반발 전후의 볼의 속도가 측정되었다. 또한 저자<sup>(2)</sup> 등은 라켓 자체에 대해서 굽힘진동의 감쇠비 및 진동모멘트와 모우드 해석에 의해 라켓의 동적 거동을 안정타점 영역의 확장과 관련 시키 연구하였다.

그러나 테니스 라켓에 진동응답의 측정점을 거트상

\* 정회원, 한양대학교 공과대학 기계공학과

\*\* 한양대학교 공과대학 정밀기계공학과

\*\*\* 정회원, 한양대학교 공과대학 정밀기계공학과

에 선택하게 되는 경우 이때 가속도계의 부착 및 가진이 어렵게 된다. 따라서 본 연구에서는 음향학적 고찰로써 최근 디지털 처리기술의 발달에 따른 근접한 2점의 음압으로부터 테니스 라켓의 공기입자속도를 근사적으로 구하기 위하여 두개의 마이크로폰을 이용하여<sup>(5)</sup> 계산된 음향인텐시티는 구조물의 모우드 해석법에 의해<sup>(2)</sup> 구해진 테니스 라켓의 동적 특성과 비교 검토함으로써 진동과 음의 발생기구를 규명하고 측정계의 비접촉에 의한 테니스 라켓의 동적 거동을 규명하였다.

2. 음향 인텐시티 계측의 기초이론<sup>(5)</sup>

2.1 Elasto-Acoustic 계의 표면 인텐시티

입력의 음장의 한 계측점에서 음향 인텐시티는 그점의 음압과 공기입자속도에 의해서 다음과 같이 정의되며 이것을 표면인텐시티라고 부른다.

$$\vec{I} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T \vec{p}(t) \vec{u}(t) dt = \langle \vec{p}(t) \vec{u}(t) \rangle \quad (1)$$

여기서  $p(t)$ 는 음압,  $\vec{u}(t)$ 는 입자속도를 나타내며  $\langle \rangle$ 는 시간평균을 의미한다. 한편 2개의 랜덤 데이터간의 상호상관함수 관계로 확장하여 생각하면 식(1)을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$R_{u,p}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T \vec{u}(t) \vec{p}(t+\tau) dt \quad (2)$$

여기서  $\tau$ 는 공기입자의 움직이는 속도와 음압과의 시간지연을 나타내며 단일 입자속도와 음압신호 사이의 시간지연이 없다고 가정하면 식(2)는 다음과 같이 된다.

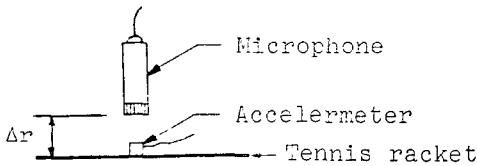


Fig. 1 Transducer configuration for surface intensity measurement

$$R_{u,p}(0) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T \vec{u}(t) \vec{p}(t) dt = \vec{I}$$

여기서 음향인텐시티는 상호상관함수에 의해서 계산됨을 알 수 있다. 식(3)은 Fig. 1에 나타낸 바와 같이 입자속도를 측정하는 변환기와 방사음을 측정하는 변환기 사이의 거리가 무한히 적을때 엄밀하게 성립한다. 즉, 이와같은 계산 방법은 실제계의 경우 2개의 변환기 사이의 거리  $\Delta r$ 이 유한하기 때문에 오차를 유발시키는데, 이러한 오차는  $\Delta r$ 과 원하는 주파수 영역

을 설정함에 따라 오차를 최소화 할 수 있다<sup>(6)</sup>.

한편 시간영역에서 취한 각각의 신호에 대하여 F.F.T 분석기를 이용하여 상호상관함수를 계산하기 위해서는 먼저 주파수 영역에서 상호 스펙트럼을 계산한 뒤 다시 역푸리에 변환을 수행한다. 이때 얻어진 상호상관함수는 식(3)에서 알 수 있듯이 음향인텐시티를 구하는 것이 되며 크로스 스펙트럼과의 관계는 다음과 같이 나타낼 수 있다<sup>(7)</sup>.

$$R_{u,p}(\tau) = \int_0^\infty G_{u,p}(f) e^{i2\pi f \tau} df = \int_0^\infty [C_{u,p}(f) - iQ_{u,p}(f)] e^{i2\pi f \tau} df \quad (4)$$

여기서  $G_{u,p}(f)$ 는 한쪽(one sided)크로스 스펙트럼,  $C_{u,p}(f)$ 는 cospectrum,  $Q_{u,p}(f)$ 는 quadspectrum을 각각 나타낸다. 속도변환계와 마이크로폰 각각의 위상특성과 두지점 사이의 물리적인 분리는 주파수 영역에서 인위적인 시간지연( $\tau_0$ )을 발생시키면 다음과 같은 관계식이 성립한다.

$$\tau_0 = \phi / 2\pi f \quad (5)$$

식(5)를 식(4)에 대입하여  $e^{i\phi}$ 를 Euler 정리하면 상호상관함수로부터 실제의 표면인텐시티는 다음과 같이 나타낸다.

$$\vec{I} = R_{u,p}(\tau_0) = \int_0^\infty [C_{u,p}(f) \cos\phi + Q_{u,p}(f) \sin\phi] df \quad (6)$$

한편, 실제계에서 입자속도를 측정하기 위하여 가속도 신호를 사용하게 되는데 주파수 영역에서 그 관계식을 나타내면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$U(f) = \frac{-i}{2\pi f} A(f) \quad (7)$$

식(6), (7) 및 유한푸리에 변환식  $\langle G_{u,p}(f) = \frac{2}{T} E[U^*(f, T)P(f, T)] \rangle$ 을 이용하여 표면가속도항을 이용한 음향인텐시티는

$$|\vec{I}|_c = \frac{1}{2\pi} \int_0^\infty [Q_{u,p}(f) \cos\phi - C_{u,p}(f) \sin\phi] \frac{df}{f} \quad (8)$$

이 된다. 만약 식(8)에서 위상차가  $0^\circ$ 가 아니라면 식(8)의 크로스 스펙트럼의 실수 및 허수항은 음향인텐시티에 영향을 미치는 것을 알 수 있다. 즉  $\phi = 0^\circ$ 일 때 식(8)은 다음과 같이 유도된다.

$$|\vec{I}| = \frac{1}{2\pi} \int_0^\infty \frac{1}{f} [Q_{u,p}(f)] df \quad (9a)$$

$$|\vec{I}(f)| = \frac{1}{2\pi f} [Q_{u,p}(f)] \quad (9b)$$

만일 위상각이  $0^\circ$ 가 아닐때 음향인텐시티에 중요한 오차가 발생하므로 교정되지 않으면 안되는데 이에 대한 연구는 최초로 Brito<sup>(8)</sup>에 의해 보고되었다.

만약 위상차가 없다고 가정하면 인텐시티는  $Q_{u,p}$ 에 비

해하며 위상차가 존재하면 실제의 인텐시티는 식(8)이 된다. 따라서 위상차를 교정하지 않을때의 오차를 구하여 보면 다음과 같이 정의한다.

$$E = 10 \log(|I_i|/|I|) = 10 \log[\cos\phi - (C_{ap}/Q_{ap})\sin\phi] \quad (10)$$

한편 식(10)을 위상변화에 따른 오차로 나타내면 Fig. 2와 같다. 그림에서 위상이 20°를 넘지 않는다면 위상오차는 2dB 이내로 됨을 알 수 있다. 만일 co-spectrum이 quad-spectrum 보다 훨씬 커지면 위상오차는 훨씬 커져감을 알 수 있다.

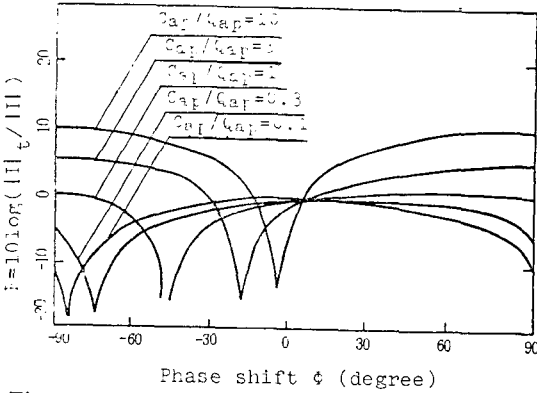


Fig. 2 Error in intensity level caused by uncorrected phase shifts

### 2.2 2개의 마이크로폰을 이용한 음향 인텐시티의 측정원리<sup>(9)</sup>

전절에서 나타낸 바와 같이 표면인텐시티는 진동하는 물체의 표면에서의 공기입자속도와 음압에 의해서 정의되었다. 그러나 실제로 진동체로부터 입자속도를 측정하기 어려운 경우가 많다. 특히 음원으로 부터 거리가 충분히 떨어져 있는 음장(평면파음장)에서 그러하며, 이런 경우에는 음압과 입자속도와와의 관계를 음압만의 관계로부터 계산하기 위하여 다음과 같은 관계를 이용하게 된다.

$$p = \rho c u \quad (11)$$

여기서  $\rho$ 는 공기의 밀도,  $c$ 는 음속을 나타낸다. 식(11)을 식(1)에 대입하여 정리하면

$$I = \frac{\langle p^2 \rangle}{\rho c} \quad (12)$$

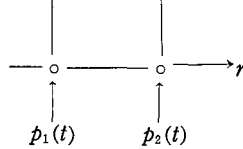
이 된다. 그러나 음원의 근처에서 식(12)가 성립하지 않는 음장에서는 식(1)에 의하여 음의 강도를 구할 필요가 있지만 음압과의 위상관계를 정확히 유지시키는 조건에서 입자속도를 측정하는 일은 매우 어렵다. 따라서 측정방향(입자속도의  $r$  방향) 성분만을 고려하여 유동이 없고 점성감쇠가 없는 경우 운동방정식은 다음

과 같이 나타낸다.

$$\rho \frac{\partial u_r(t)}{\partial t} + \frac{\partial p(t)}{\partial r} = 0 \quad (13)$$

한편 미소거리  $\Delta r$  만큼 떨어진 두점의 음압을  $p_1(t)$ ,  $p_2(t)$ 라고 하면 두점간의 음압구배는 근사적으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial p(t)}{\partial r} \doteq \frac{p_2(t) - p_1(t)}{\Delta r} \quad (14)$$



또한, 입자속도는 다음과 같이 근사화 할 수 있다.

$$u(t) = -\frac{1}{\rho} \int_{-\infty}^t \frac{\partial p(\tau)}{\partial r} d\tau = -\frac{1}{\rho \Delta r} \int_{-\infty}^t [p_2(\tau) - p_1(\tau)] d\tau \quad (15)$$

따라서 미소거리  $\Delta r$  만큼 떨어진 위치의 음압을  $p_1, p_2$ 라고 하면 2점의 중앙위치에서 음압  $p(t) = \frac{p_1(t) + p_2(t)}{2}$ 를 이용하여 음향인텐시티  $I$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \vec{I} &= \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T u(t) p(t) dt = \langle p(t) \vec{u}(t) \rangle \\ &= -\frac{1}{\rho \Delta r} \left[ \frac{p_1(t) + p_2(t)}{2} \int_{-\infty}^t [p_2(\tau) - p_1(\tau)] d\tau \right] \end{aligned} \quad (16)$$

여기에서 신호의 정상성(stationarity) 에르고딕성(ergodicity)에 의하여  $\left[ p_1(t) \int_{-\infty}^t p_1(\tau) d\tau \right] = 0$ 이 되며, 특히  $\left[ p_1(t) \int_{-\infty}^t p_2(\tau) d\tau \right] = \left[ -p_2(t) \int_{-\infty}^t p_1(\tau) d\tau \right]$ 의 관계에서 식(15)의 음향인텐시티  $I$ 는 다음과 같이 표시된다.

$$I = -\frac{1}{\rho \Delta r} \left[ p_1(t) \int_{-\infty}^t p_2(\tau) d\tau \right] \quad (17)$$

식(17)의 관계를 주파수 영역에서 계산함으로써  $f_1 \sim f_2$ 의 주파수 영역의 음의 강도  $I(f_1 \sim f_2)$ 를 나타내는 다음과 같은 관계식이 유도된다.

$$I(f_1 \sim f_2) \doteq -\frac{1}{2\pi \rho \Delta r} \int_{f_1}^{f_2} \frac{I_m \{G_{12}(f)\}}{f} df \quad (18)$$

단,  $I_m$ 은 허수부를 표시하며  $G_{12}(f)$ 는 음압  $p_1(t)$ 와  $p_2(t)$ 의 상호스펙트럼 밀도함수를 나타내고 있다. 식(16)과 식(18)은 2개의 마이크로폰 간격  $\Delta r$ 이 무한히 적을때 엄밀하게 성립되지만 실제로는  $\Delta r$ 이 유한하기 때문에  $k \Delta r$ 이 크게 ( $k$ : wave number)되면 고주파일수록 큰 오차를 발생한다. 이와 같은 관계는 마이크로폰 거리와 측정주파수의 한계 및 측정점과 음원까지의 최

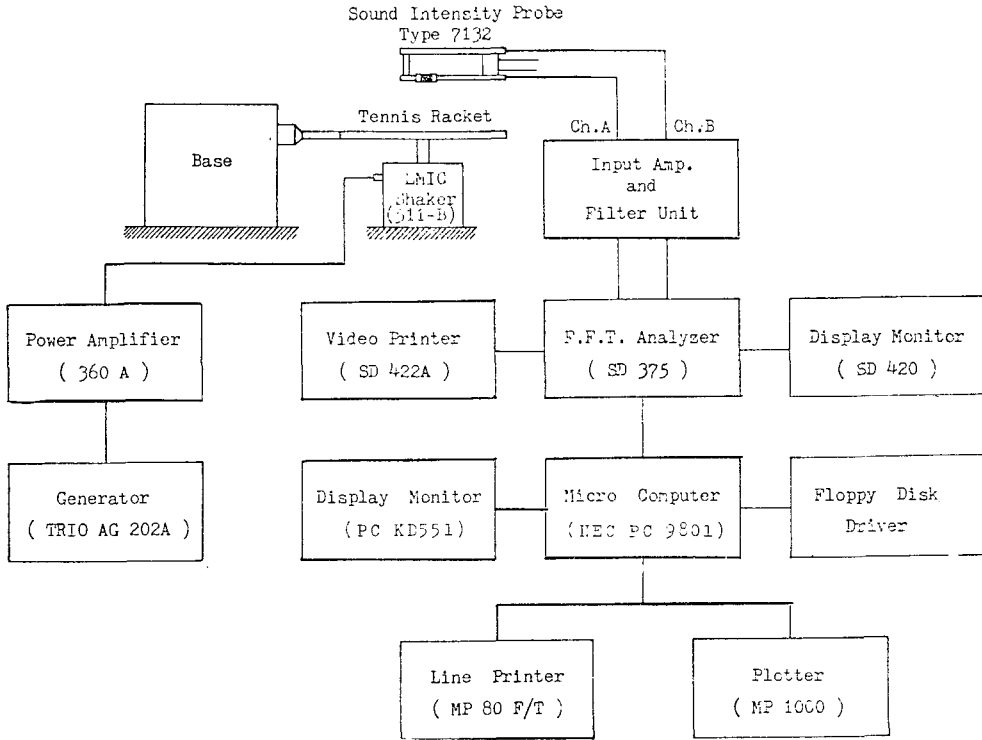


Fig. 3 Schematic diagram of experimental apparatus

소거리에 의해 결정되는데 Thompson과 Tree<sup>(10)</sup>는 전형적인 음원에 대해서 이론적으로 오차를 검토하여 이 오차를  $\pm 1.5\text{dB}$  이내로 하기 위해서는 다음과 같은 조건을 만족할 필요가 있다고 하였다.

$$k\Delta r \leq 1.3$$

$$0 \leq \frac{\Delta r}{r} \leq 0.5 \quad (19)$$

이밖에 음향인텐시티를 측정하는데 여러가지 오차문제가 발생하는데 이에 대해서는 참고문헌(10)을 이용하여 본 연구에 필요한 주파수 측정한계에 적절하도록 오차문제를 해결하였다.

따라서 본 연구에서는 근접하는 두점에서 음압에 대한 크로스 스펙트럼 함수를 구하고 그 허수부에 대하여 식(18)을 적용함으로써 임의의 주파수 영역에서 음의 강도를 구하였다. 한편 협대역(narrow band)주파수로 계산된 결과는 다시 1/3 옥타브밴드로 환산하여 출력시키도록 하였다.

### 3. 실험

#### 3.1 측정계 및 데이터 처리

Fig. 3은 본 연구에 사용된 측정계 및 데이터 처리

의 계통도를 나타낸다. 본 실험에서는 두개의 마이크로폰 사이의 거리를 50mm로 하였다. 이것은 테니스 라켓의 중요한 주파수 영역 25Hz~1250Hz에서 식(17), (18)의 근사화에 의해 발생하는 오차문제가 무시될 수 있도록 하기 위해서이다. 음향인텐시티 측정에 사용된 마이크로폰은 1/2인치 콘덴서 마이크로폰으로서 대향형(face to face)으로 배치되어 있고, 전용 마이크로폰 코드로 데이터 해석부에 연결되어 있다. 2개의 마이크로폰의 교정은 피스톤폰(B & K type 4220)에 의해 음향인텐시티 프로브에 250Hz의 정현파로 음압 레벨을 부여하여 간단하고 정확하게 교정한 결과 250Hz에 124dB의 음압레벨을 나타내었다<sup>(6)</sup>. 해석장치로는 2채널 F.F.T 분석기를 사용하였으며 이 해석장치는 IEEE-488의 인터페이스에 의해 마이크로 컴퓨터와 연결되어 데이터를 전송 및 처리하도록 하였다. 각종 데이터는登高선 및 3차원 그래프로 작성하여 가시적으로 음원을 정확하게 검출하도록 하였다.

#### 3.2 실험장치 및 실험방법

본 연구에 사용된 테니스 라켓 프레임의 재질은 그라파이트이며, Fig. 4에 나타낸 바와 같이 가진기(EMIC

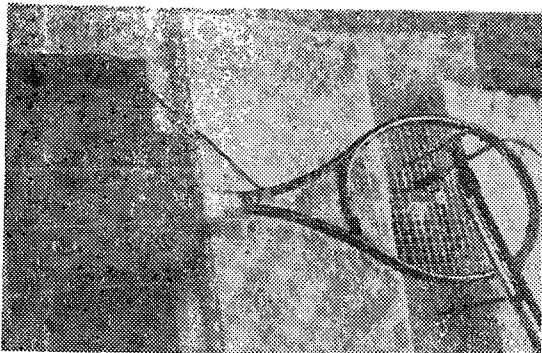


Fig. 4 Experimental set-up for acoustic intensity measurement

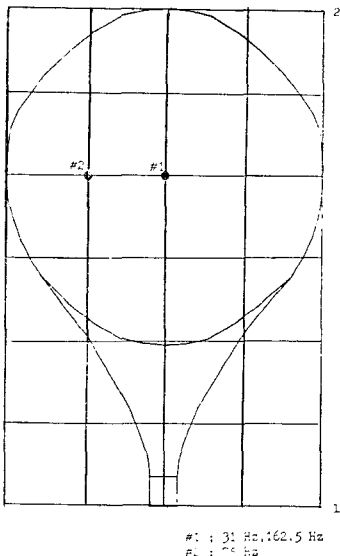


Fig. 5 Exitting point

511B)와 거트를 연결시켜 주파수를 바꾸어 가면서 라켓을 가진하였다. 본 실험에서는 모우드 해석법에 의

해 진동특성을 규명한 결과<sup>(2)</sup>와 음향특성과의 비교를 위해서 한개의 마이크로폰을 이용한 예비실험을 통해 얻어진 라켓의 고유진동수 31Hz, 75Hz, 162.5Hz를 가진 주파수로 하였다. 가진점 및 음향 인텐시티의 측정점 위치는 Fig. 4와 Fig. 5에 나타내고 있다. 특히 가진점은 #1(31Hz, 162.5Hz), #2(75Hz)을 선택하여 각각 굽힘 및 비틀림진동이 발생하도록 하였으며 음향 인텐시티의 측정점은 Fig. 5에 나타난 바와같이 10cm 간격으로 35점을 선택하였고 다시 데이터간을 10등분하여 cubic spline 보간법<sup>(11)</sup>을 이용하여 보다 정밀한 그래프를 작성하도록 하였다. 각 측정점에서 1024개의 데이터를 샘플링시간 500 $\mu$ s로 8회에 걸쳐 평균화 하였으며 평균화 함수는 선형함수를 사용하였다. 테니스 라켓으로부터 마이크로폰의 거리는 식 (19)를 만족하며 오차를 적게 하기 위하여 20cm 떨어진 곳에 위치시켜 음향 인텐시티를 측정하였다. 이상의 측정하고자 하는 저주파 및 고주파 한계에 대한 음향인텐시티의 유효구간을 결정하기 위한 오차와의 관계를 Fig. 6 나타내었다<sup>(10)</sup>.

#### 4. 실험결과 및 고찰

##### 4.1 음향 인텐시티의 소프트웨어 개발

본 연구에서는 음향 인텐시티를 이용한 소음원 검출을 위하여 등고선 및 3차원 그래프를 개발하여 해석 결과를 쉽게 판단하는데 도움이 되도록 하였다. 등고선 그래프는 인접한 2점의 함수치 사이에 있는 값을 찾아 등고선으로 연결한 것이며 3차원 그래프는 각 측정점의 인텐시티 값을 연결한 것이다. Fig. 7은 등고선 및 3차원 그래프의 흐름도를 나타내고 있다. 특히 측정점 100개의 데이터만으로는 가시적인 판단이 불충분하므로 본 연구에서는 cubic spline 법<sup>(11)</sup>을 이

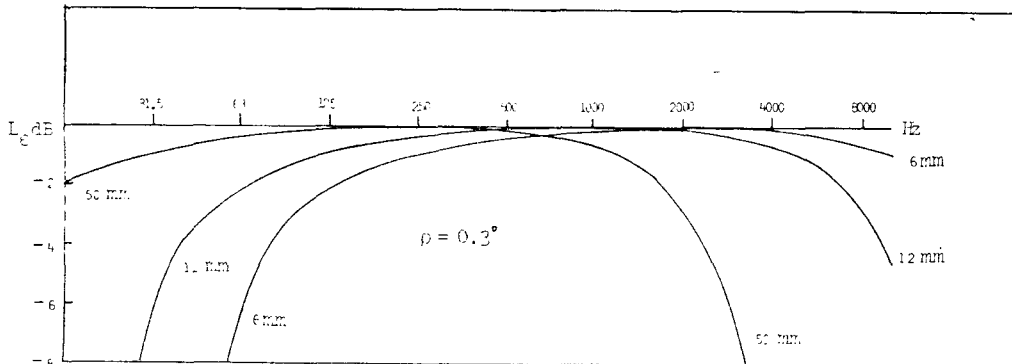
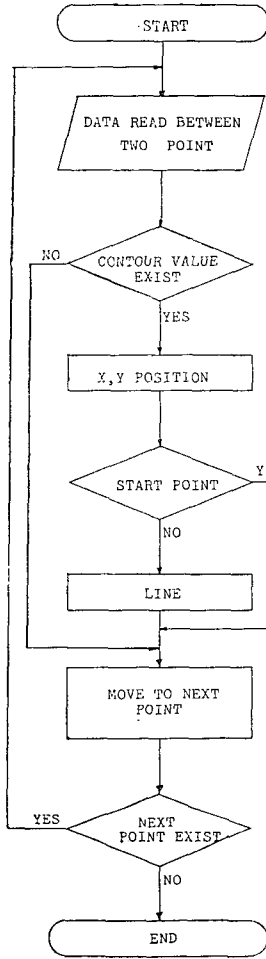
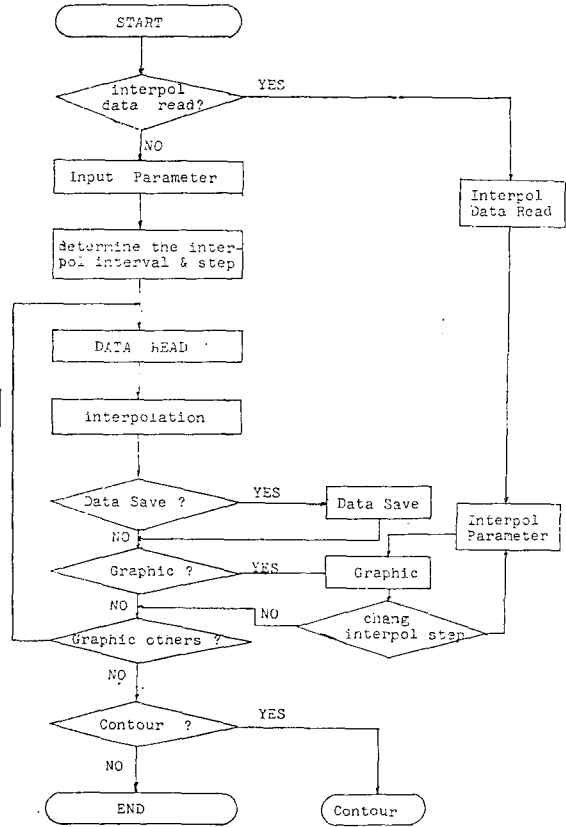


Fig. 6 Approximation error,  $L_e$ , at high frequencies for various spacers and maximum approximation error,  $L_e$ , at low frequencies for various spacers for a phases matching of  $0.3^\circ$



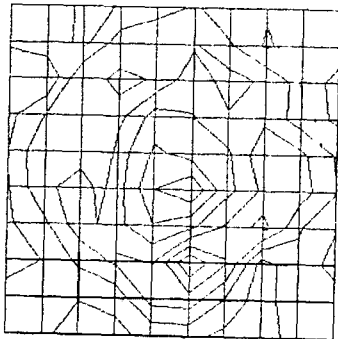
(a) Contour plot program



(b) 3D plot program

Fig. 7 Flow charts of programs used in acoustic intensity method

용하여 interpolation 된 데이터를 사용하였다. Fig.8 은 interpolation 전후를 비교하여 나타낸 것으로 interpolation 에 의해 음향 인텐시티 패턴을 충분히 알 수 있게 되었다.

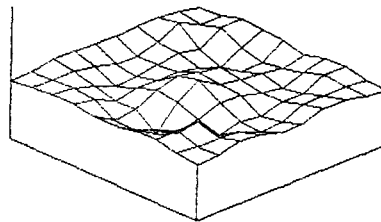


Contour Plot

(a) Before interpolation

#### 4.2 가진주파수 변화에 따른 음향 인텐시티의 주파수 특성

테니스 라켓의 음향 인텐시티를 측정하기 위하여 31



3D Plot

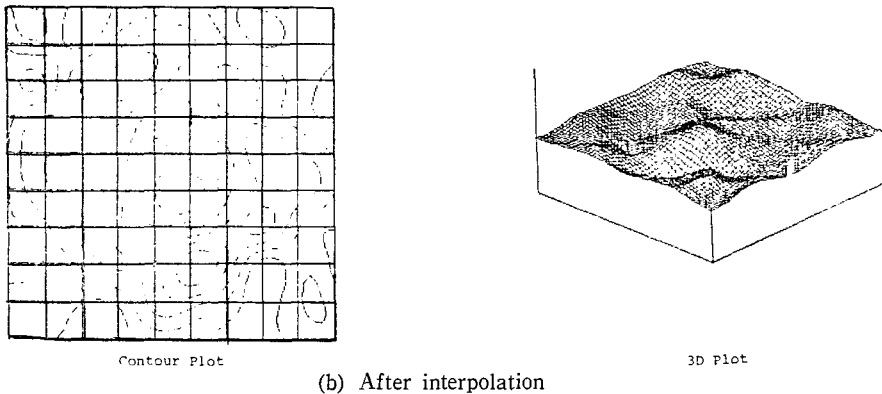


Fig. 8 Comparisons of Contour and 3D Plot according to the interpolation

Hz, 75Hz, 162.5Hz 등으로 가진시켰을때 발생한 음향인텐시티 스펙트럼을 Fig. 9에 나타내었다. 측정된 결과는 1024개의 데이터를 F.F.T에 의해서 주파수 분석한 결과를 1/3 옥타브 밴드로 변환시킨 것이다. 그림에서 나타낸 바와같이 각 가진주파수에서의 현저한 음향인텐시티를 나타내고 있으며 이와같은 결과는 테니스 라켓의 진동특성과 음향특성이 유사함을 나타내고 있음을 알 수 있다. 그러나 가진기에 의해 각 주파수에서 가해진 가진력은 힘변환기에서 측정된 결과 똑같은 양이었음에도 불구하고 진동의 3차모우드에 해당되는 162.5Hz에 의한 음향인텐시티가 가장 크게 나

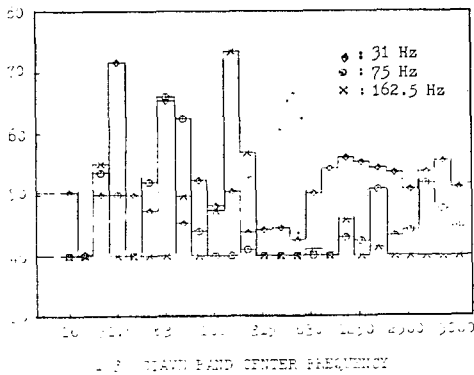


Fig. 9 Comparison of 1/3 octave band acoustic intensity spectrum of tennis racket.

타내고 있는 것으로 보아 이와같은 3차모우드의 거동에 주목할 필요가 있다고 생각된다.

### 4.3 음향 인텐시티의 등고선 및 3차원 표시에 의한 테니스 라켓의 거동

Fig. 10에 나타낸 바와같이 테니스 라켓의 1차모우드에 해당되는 31Hz의 굽힘진동에 의해 발생하는 음

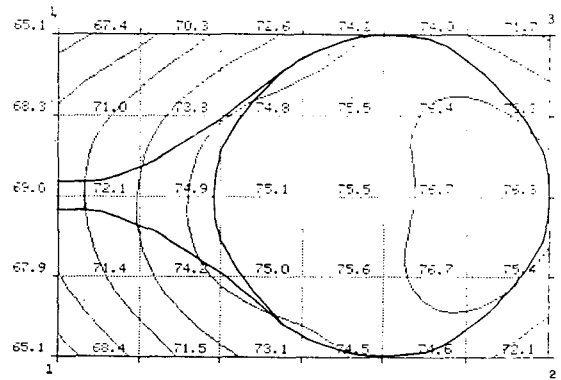


Fig. 10 Equal intensity contour map measured with 50mm spacer of tennis racket at 31Hz. (Exciting point #1)

향인텐시티는 테니스 라켓의 그림부에서 약하고 거트 끝부분에서 강해지는 현상을 잘 나타내고 있으며, 한편 테니스 라켓의 굽힘진동에 대한 파장은 공기중 음파의 파장과 관계에 의해 음의 방사 및 흡음의 관계를 알 수 있는데 Fig. 11은 음향인텐시티를 음영의 차이로 이미지 처리한 결과를 나타내고 있다. 그림에서 알 수 있듯이 1차모우드에 의한 음향인텐시티가

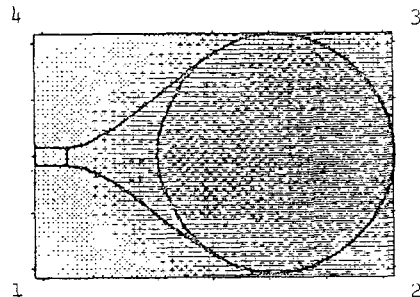


Fig. 11 Image pattern of tennis racket at 31 Hz. (Exciting point #1)

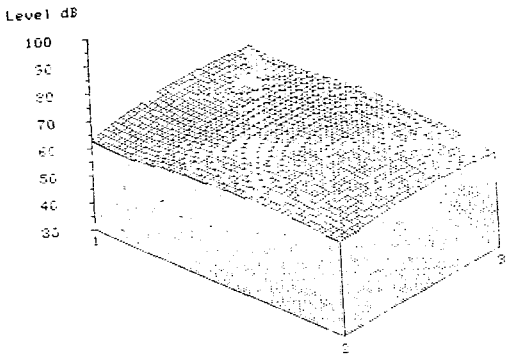


Fig. 12 3-D plot of normal intensity of tennis racket at 31 Hz. (Exciting point #1)

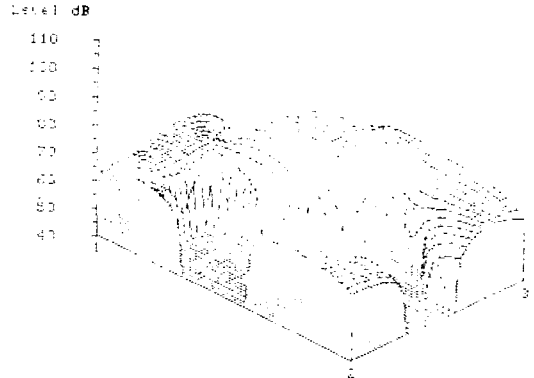


Fig. 15 3-D plot of normal intensity of tennis racket at 75 Hz. (Exciting point #2)

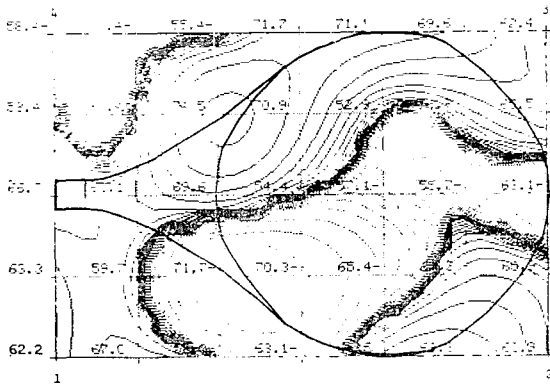


Fig. 13 Equal intensity contour map measured with 50mm spacer of tennis racket at 75Hz. (Exciting point #2)

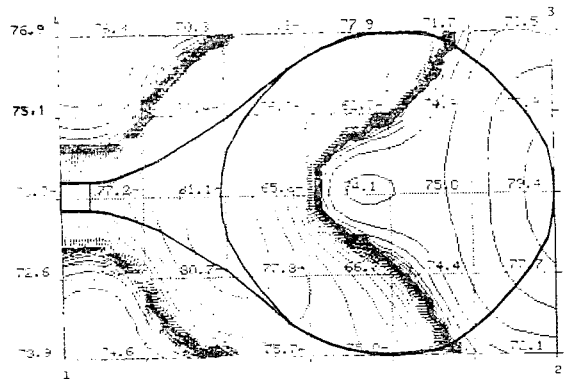


Fig. 16 Equal intensity contour map measured with 50mm spacer of tennis racket at 162.5 Hz. (Exciting point #1)

잘 나타나고 있음을 알 수 있다. 또한 음의 방사 및 흡음상태를 가시적으로 알기 쉽도록 3차원 그래프도 Fig. 12에 나타내었다. 상방향의 음향 인텐시티는 테니스 라켓이 가진 되었을 때 음이 방출되는 것을 알 수 있다. 마찬가지로 75Hz 즉 테니스 라켓의 2차 진동모우드에 해당되는 비틀림진동에 대한 음향인텐시티는 가진점이 테니스 라켓의 좌측부에 위치하고 있으므로

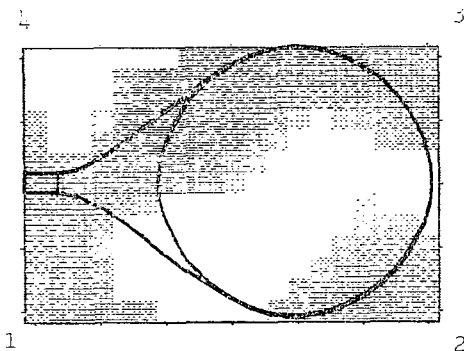


Fig. 14 Image pattern of tennis racket at 75 Hz. (Exciting point #2)

좌·우측에 있어서 음향인텐시티는 음·양을 나타내고 있는 것으로 보아 음향학적으로도 테니스 라켓은 비틀림 운동을 하고 있음을 Fig. 13에서 알 수 있다. 한편 음의 방출 및 흡입에 대한 특성을 이미지 처리에 의해서 나타낸 결과를 Fig. 14에 나타내었다. 그림에서 나타내는 바와같이 음·양의 관계로부터 확실하게 음의

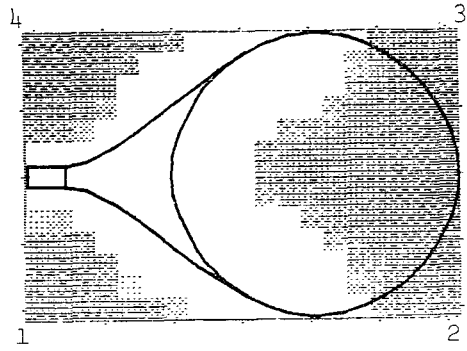


Fig. 17 Image pattern of tennis racket at 162.5Hz. (Exciting point #1)



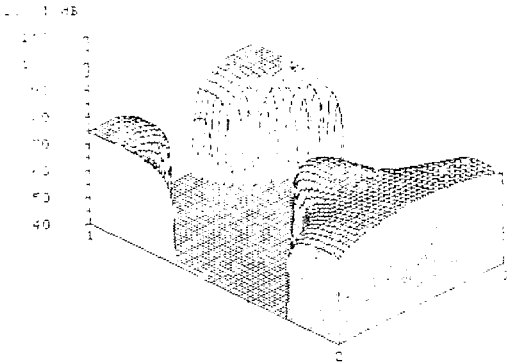


Fig. 18 3-D plot of normal intensity of tennis racket at 162.5Hz (Exciting point #1)

방출·흡입 관계를 잘 알 수 있다. 음향의 특성을 가지적으로 잘 알 수 있도록 나타낸 것이 Fig. 15이다. 다음은 3차 진동모우드인 162.5Hz로 가진하였을 때 음향인텐시티의 특성을 Fig. 16, Fig. 17, Fig. 18에 나타내었다. 그림에서 볼 수 있듯이 3차진동모우드에 의한 음의 방출 및 흡입특성을 잘 알 수 있다. 따라서 이와같은 테니스 라켓의 음향학적 고찰에 따라 테니스 라켓의 동적특성을 잘 파악할 수 있으리라 생각된다.

#### 4.4 진동특성과 음향특성과의 비교

가진력 및 진동신호의 측정에 의해 얻어진 테니스 라켓의 전달함수특성을 Fig. 19, Fig. 20에 각각 표시하였다. Fig. 19는 가진점 #1, Fig. 20은 가진점 #2

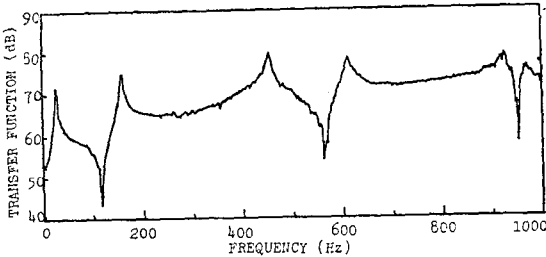


Fig. 19 Transfer function for impact position #1

에 대한 주파수응답을 각각 나타내고 있다. 한편 전달함수의 허수부를 이용하여 1차, 2차, 3차 고유진동수에 대한 진동모우드 패턴과 음향인텐시티에서 얻어진 음의 방출 및 흡입의 경계선을 각 가진 주파수에 대해 테니스 라켓의 동적특성<sup>(2)</sup>을 나타내면 Fig. 21, Fig. 22, Fig. 23과 같다. Fig. 21에서의 결과는 테니스 라켓의 거트 부분의 끝쪽에서 음이 발생하고 있으며 Fig. 22는 테니스 라켓의 기하학적 중심으로부터 약간 그림쪽의 처진 쪽에서 음이 많이 방사되고 있음을 알

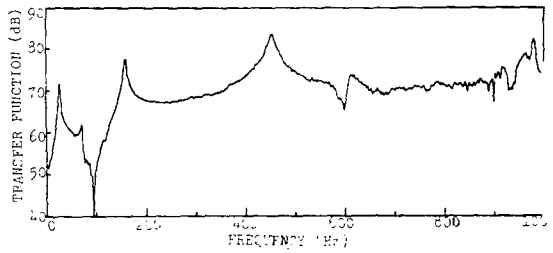


Fig. 20 Transfer function for impact position #2

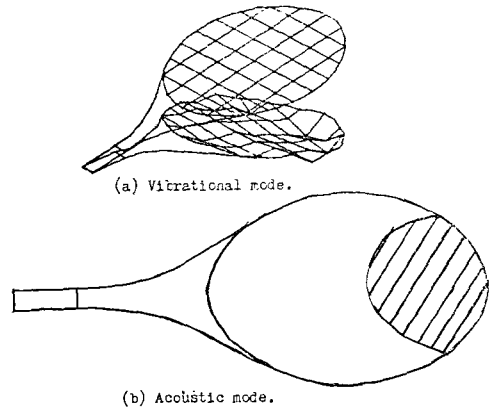


Fig. 21 Comparison between vibrational mode and acoustic mode at 31Hz

수 있다. 한편 Fig. 23은 가진점과 그림과의 사이 그리고 거트의 끝부분 즉 1차굽힘진동에 의한 방사음의 결합으로 구성되어 있음을 알 수 있다. 따라서 음향인텐시티에 의해 얻어진 등고선 및 이미지 처리 그리고 3차원 그래프에 따라 진동모우드의 거동을 감소시키

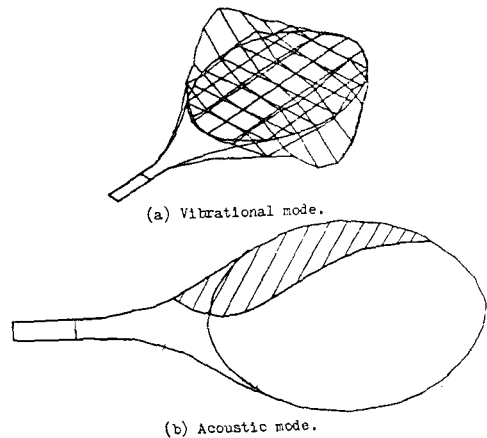


Fig. 22 Comparison between vibrational mode and acoustic mode at 75Hz

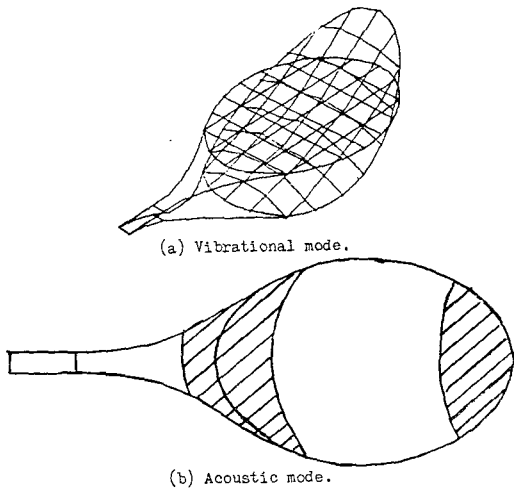


Fig. 23 Comparison between vibrational mode and acoustic mode at 162.5Hz

는 대책을 음향인텐시티법에 의해서도 가능함을 시사하고 있다.

## 5. 결 론

테니스 라켓의 동적 특성에 대한 음향학적 고찰에 의하여 해석결과 얻어진 결론은 다음과 같다.

(1) 음향인텐시티법에 의한 등고선 및 이미지 처리 그리고 3차원그래프에 의해서 라켓의 동적특성을 가시적으로 명확하게 규명할 수 있었다.

(2) 진동모우드의 패턴과 음향인텐시티의 패턴이 잘 일치하고 있음을 확인하였으며 장차 복잡한 구조물에 대한 진동과 방사음과의 관계를 규명할 수 있는 가능성을 제시하였다.

(3) 음향인텐시티법에 의하여 테니스 라켓의 동특성을 규명할 수 있도록 마이크로 컴퓨터에 의해 소프트웨어를 개발하였다.

## 후 기

본 연구를 수행하는데 협조해주신 주식회사 한일라켓 사장 및 관계자 여러분께 진심으로 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

- (1) M. Miyashita, et al., Tennis: the Effect of Grip Firmness on Ball Velocity after Impact, *Medicine and Science in Sports*, Vol. 11, No. 4, pp.21~25, 1979
- (2) 吳在應, 廉成夏, 모드解析法によるテニスラケットの動特性の同定に關する研究, *日本機械學會論文集(C編)*, 第51卷, 第471號, pp.2966~2973, 1985
- (3) 吳在應, 外 2人, 多次元スペクトル解析によるテニスラケットのパワー寄與評價に關する研究, *日本機械學會論文集(C編)*, 第51卷, 第471號, pp.2974~2979, 1985
- (4) T.M. McLaughlin and N.R. Miller, Techniques for Evaluation of Loads on the Forearm prior to Impact in Tennis Strokes, *J. Mechanical Design*, Vol. 102, pp.1242~1246, 1980
- (5) J.Y. Chung, et al, Application of Acoustic Intensity Measurement Engine Noise Evaluation, SAE paper 790502, 1979
- (6) J.Y. Chung, Cross-Spectral Method of using Acoustic Intensity without Error caused by Instrument Phase Mismatch, *J. Acoust. Soc. Am*, Vol. 64, No. 6, pp.1613~1616, 1978
- (7) J.S. Bendat and A.G. Piersol, *Engineering Application of Correlation and Spectral Analysis*, Wiley Interscience, 1980
- (8) J.D. Brito, *Sound Intensity Patterns for vibrating Surfaces*, Ph.D thesis MIT, Cambridge, MA, 1976
- (9) 孫章烈, 吳在應, 金興植, 현장에서 크로스 스펙트럼을 이용한 출입문의 차음성능 측정법에 관한연구, *대한건축학회지*, 제29권, 제124호, pp.30~35, 1985
- (10) J.K. Thompson and D.R. Tree, *Finite Difference Approximation Errors in Acoustic Intensity Measurements*, *J. Sound and Vibration*, Vol. 75, No.2, pp.229~238, 1981
- (11) C.F. Gerald and P.O. Wheatley, *Applied Numerical Analysis*, Addison-Wesley Pub. Co., 3rd, 1984