

테니스라켓의 안정타점영역확장을 위한
CAD화에 관한 연구

오재응, 박호, 염성하
한양대학교 공과대학 정밀기계공학과

CAD for Extension of Sweet Spot of the Tennis Racket

Jae-Eung Oh, Ho Park and Sung-Ha Yum

Department of Precision Mechanical Eng., Hanyang University

1. 서론

최근 테니스의 저변인구가 크게 증가함에 따라 테니스라켓의 제작기술도 상당한 수준에 이르렀고 설계 제작의 자동화에 의해서 양질의 제품이 시판되고 있다. 그러나 라켓에 볼이 임팩트될때 생기는 진동으로 야기되는 테니스 엘보우 등, 해결해야할 문제들이 아직도 남아있다. 이와같이 테니스라켓의 정적인 강도 뿐만 아니라 동적인 특성도 중요한 관심의 대상이 되어감에 따라 볼 컨트롤을 용이하게 한다거나, 안정타점영역(Sweet Spot)의 확장과 그립부의 진동등에 의해서 발생하는 엘보우 현상을 방지하기위해 여러가지 연구가 수행되어 왔다. 특히, 다차원 스펙트럼해석 및 모드 해석법에의해 그립부에 미치는 진동원의 동정과 라켓의 동적거동에 대해서 연구되었고, 라켓의 재질변경과 그립부의 구조변경에 의한 안정타점영역에 영향을 미치는 모드 파라미터(Modal Parameter)의 추정에 관한 연구도 수행되었다. 이러한 연구들은 결국 안정타점영역을 확장시키거나 테니스 엘보우를 방지하기 위한 것으로서 이러한 목적을 달성하기위해 테니스라켓의 진동 모드에 관계되는 파라미터들을 찾아서 그 모드 파라미터의 변화에 따르는 진동 모드의 거동에 대해서 연구할 필요가 있다.

본 논문에서는 실험적인 모드 해석법을 실제 테니스라켓에 적용하여 모드 파라미터들을 구한 다음 그 파라미터의 변화에 따르는 안정타점영역의 변화를 컴퓨터 시뮬레이션을 통해서 예측하였다. 또한 안정타점영역을 넓히고 라켓의 동특성을 개선시킬수 있는 모드 파라미터를 찾아서 테니스라켓의 설계, 제작 단계에 정보를 제공하는 CAD (Computer Aided Design)에 좋은 자료를 얻고자한다.

2. 전달함수 측정에 의한 모드 해석법

테니스라켓의 게가 속도에 비례하는 진성감쇠를 갖

는 경우의 운동방정식은 일반적인 매트릭스 표현을 이
용하면

$$[M]\{\ddot{x}(t)\} + [C]\{\dot{x}(t)\} + [K]\{x(t)\} = \{f(t)\} \dots\dots\dots (1)$$

로 쓸수 있다. 여기에서 $[M]$, $[C]$, $[K]$ 는 질량, 감쇠, 강성 매트릭스를 각각 나타낸다.

식(1)은 각 측정점에서의 진동은 진동 모드 의 선형결합 및 직교성을 이용해서 모드 파라미터에 의한 계의 응답과 외력간의 식을 비례점성감쇠의 경우에 대해서 쓰면

$$\{X\} = \sum_{r=1}^n \frac{\{\psi_r\} \{\psi_r\}^T}{-\omega^2 m_r + j\omega c_r + k_r} \{F\} \dots\dots\dots (2)$$

로 된다. 여기에서 설명을 간단히 하기 위해서 비례점성감쇠만에 대해서 쓰면 식(2)는

$$\begin{aligned} \{X\} &= \sum_{r=1}^n \frac{\{\psi_r\} \{\psi_r\}^T}{-\omega^2 m_r + j\omega c_r + k_r} \{F\} \\ &= \frac{1}{-\omega^2 m_1 + j\omega c_1 + k_1} \begin{bmatrix} \psi_{11}\psi_{11} & \psi_{11}\psi_{21} & \dots & \psi_{11}\psi_{m1} \\ \psi_{21}\psi_{11} & \psi_{21}\psi_{21} & & \\ \vdots & & & \\ \psi_{m1}\psi_{11} & & & \psi_{m1}\psi_{m1} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ \vdots \\ F_m \end{Bmatrix} \\ &+ \dots + \frac{1}{-\omega^2 m_n + j\omega c_n + k_n} \begin{bmatrix} \psi_{1n}\psi_{1n} & \dots & \psi_{1n}\psi_{mn} \\ \psi_{2n}\psi_{1n} & & \\ \vdots & & \\ \psi_{mn}\psi_{1n} & \dots & \psi_{mn}\psi_{mn} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ \vdots \\ F_m \end{Bmatrix} \\ &= \frac{1}{-\omega^2 m_1 + j\omega c_1 + k_1} \begin{bmatrix} \psi_1 \\ \psi_2 \\ \vdots \\ \psi_n \end{bmatrix} \{\psi_1 \psi_2 \dots \psi_n\}^T \begin{Bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ \vdots \\ F_m \end{Bmatrix} \\ &+ \dots + \frac{1}{-\omega^2 m_n + j\omega c_n + k_n} \begin{bmatrix} \psi_1 \\ \psi_2 \\ \vdots \\ \psi_n \end{bmatrix} \{\psi_1 \psi_2 \dots \psi_n\}^T \begin{Bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ \vdots \\ F_m \end{Bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} H_{11} & H_{12} & \dots & H_{1n} \\ H_{21} & H_{22} & & \\ \vdots & & & \\ H_{m1} & \dots & \dots & H_{mn} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ \vdots \\ F_m \end{Bmatrix} \dots\dots\dots (3) \end{aligned}$$

성분, 즉 j 점에서의 외력과 i 점에서의 응답과의 관계를 변위/힘의 전달함수의 형태로 표현하면

$$H_{ij} = \frac{X_i}{F_j} = \sum_{r=1}^n \frac{\psi_{ir} \psi_{jr}}{-\omega^2 m_r + j\omega c_r + k_r}$$

$$= \sum_{r=1}^n \frac{\frac{\psi_{ir} \psi_{jr}}{m_r}}{-\omega^2 + \omega_r^2 + j2\zeta_r \omega \omega_r} \dots \dots \dots (4)$$

이때 식(4)의 분모는 가진점 j 와 응답점 i 에 관계없이 고유진동수와 감쇠비만에 의한것이다. 즉 구조물의 어느 장소에서 측정된 전달함수에 있어서도 같은 것이며, 또한 분자 쪽은 진동 모드에의 크기에 의한 것이다. 이와같이 전달함수 측정에 의해 고유벡터를 구할 수 있으며 다음 식들의 관계에서 등가질량, 등가감쇠, 등가강성을 구할 수 있다.

$$\{\Psi_r\}^T [M] \{\Psi_r\} = m_r$$

$$\omega_r^2 = \frac{k_r}{m_r} \dots \dots \dots (5)$$

$$\zeta_r = \frac{c_r}{2\sqrt{m_r k_r}}$$

한편, 실제로 구조물의 전달함수를 측정하는 경우는 검출기, 해석기의 제약상 꼭 어떤 주파수 범위내에 있어야만 측정을 할 수 있게된다.

지금, 전달함수를 실수부와 허수부로 나누고 실제에 측정할 수 있는 주파수 범위를 $1 \sim m$ 으로 하면

$$Re(H_{ij}) = \sum_{r=1}^{l-1} \frac{\Psi_{ir} \Psi_{jr}}{-\omega^2 m_r}$$

$$+ \sum_{r=1}^m \frac{(-\omega^2 m_r + k_r) \Psi_{ir} \Psi_{jr}}{(-\omega^2 m_r + k_r)^2 + \omega^2 c_r^2}$$

$$+ \sum_{r=m+1}^n \frac{\Psi_{ir} \Psi_{jr}}{k_r} \dots \dots \dots (6, a)$$

$$Im(H_{ij}) = \sum_{r=1}^m \frac{-\omega c_r \Psi_{ir} \Psi_{jr}}{(-\omega^2 m_r + k_r)^2 + \omega^2 c_r^2} \dots \dots \dots (6, b)$$

와 같이 되며, 식(6)에서 알 수 있듯이 보정질량[식(6.a)의 1항] 및 보정강성[식(6.a)의 3항]은 실수부에만 영향을 미친다. 따라서 진동 모드를 구하기 위해서는 기존점에서의 전달함수의 허수부를 이용한다.

3. 테니스 라켓의 안정타점영역의 결정

3.1 안정타점영역의 정의

안정타점영역은 라켓과 볼의 충돌시 거트내에 형성되는 패공간으로서 비틀림 진동이나 굽힘진동이 적어 임팩트되는 순간에 손에 전달되는 느낌이 좋은 부분이다. 보통 임팩트 상에 있어서의 안정타점영역은 손에 전달되는 충격 또는 진동이 적고 거트의 반발성이 좋은 곳으로 정한다. 그러나 안정타점영역에 대한 정의는 아직 명확하게 되어 있지않고, 다음과 같은 사항이 일반적으로 알려져 있다.

- 1) 라켓의 각 면상에서 볼의 반발계수를 측정하여 거기서 최대값을 갖는 곳
- 2) 라켓에 볼이 임팩트된 경우, 그립을 잡고 있는 손에 아무 충격도 느껴지지 않는 곳
- 3) 볼을 때린 직후, 라켓의 거트는 진동을 하게 되는데, 그 진동이 최소로 되는 곳을 안정타점영역이라 한다.

한편, 라켓 자체의 감쇠특성, 그립부의 감쇠물질의 부가, 그리고 강성의 변화에 따라서 볼과 라켓이 충돌할 때 발생하는 최초의 진동의 크기가 작을수록, 최초의 진동수에 감쇠가 클수록 라켓의 안정타점영역의 확장에 영향을 미친다고 생각한다.

3.2 안정타점영역의 선정기준과 표현

본 논문에서 안정타점영역을 선정하는 기준은 Fig.1과 같이 2차 모드(비틀림 진동), 3차 모드(2차 굽힘 진동)의 절점(node line)을 고려하여 진동이 적은 곳을 선정하였다. 이때 Fig.2와 같이 라켓의 진동을 측면에서 보았을 때 2차, 3차 진동 모드에 있어서 최대 진동 크기의 40% 정도에 해당하는 부분내로 결정하였는데, 2차 진동 모드에서의 B의 값과 3차 진동 모드에서의 A1, A2의 값을 찾아서 2차, 3차 진동 모드에의 절점이 교차하는 점C를 중심으로 하는 2개의 반타원이 이루는 패공간을 안정타점영역으로 표현하여, 모드 파라미터의 변화에 따르는 안정타점영역의 변화를 예측하였다.

3.3 모드 파라미터의 변화에 따르는 안정타점영역의 예측

가진실험에 의하여 얻은 모드 파라미터의 값으로부터 전달함수를 계산하고 전달함수의 허수부를 이용하여 각 측정점에서의 고유벡터를 구한다. 이 고유벡터의 값을 이용해서 진동 모드에의 형태를 구하고 앞에서 설명한 선정기준에 의거 안정타점영역을 결정하게 되는데, 이때 모드 파라미터의 변화에 의해 전달함수도 달라지게 될 것이다. 곧 모드 파라미터의 변화가 안정타점영역에 변화를 끼치게 된다. 본 연구에서는 모드 파라미터의 변화에 따르는 안정타점영역을 컴퓨터 시뮬레이션을 통해서 예측하고 그 영역을 확장하기 위해서는 모드 파라미터를 어떻게 변화시켜야 할 것인가에 대해서 고찰하였다. 연구의 흐름도는 Fig.3과 같다.

4. 실험방법 및 데이터처리

4.1 실험장치 및 방법

본 연구에서는 Fig.4의 라켓을 Model Reference로 해서 가진실험을 행하였다. 실험방법으로는 실제의 racket-hand system과 비슷한 지지대를 이용하여 테니스 라켓을 고정시킨 후 라켓의 프레임부와 거트부를 임팩트 햄머(PCB 4808 Unit)로 가진하면서 그때 발생하는 진동을 가속도 픽업(Rlon PV-90A)을 이용하여 계

즉하였다. 가진점과 가속도 픽업의 위치는 Fig.6에 보인것과 같이 라켓의 2차 및 3차 모드의 모드 파라미터를 조사하기 위해서 비틀림 방향으로는 7부분, 굽힘 방향으로는 9부분으로 나누어 전달함수를 측정하였다. 테니스 라켓은 표준 사이즈를 이용하고, 장력은 실제로 사용하고 있는 약 32 Kgf의 거트 장력으로 고정하여 실험을 행하였다.

4.2 측정계 및 데이터 처리방법

본 연구의 이용한 측정계 및 데이터 처리의 블록선도를 Fig.5에 보았다. 임팩트 챔버에 의해서 테니스 라켓을 가진할 때 발생하는 힘과 가속도의 신호는 우선 다이내믹 스펙트럼 분석기(SD-375)에 의해서 아날로그 신호는 디지털 신호로 변환되어 IEEE-488 인터페이스 버스에 의해 마이크로 컴퓨터(NEC, PC-9801F)에 전송 입력된다. 입력된 데이터는 계산과정을 수행한 후, X-Y Plotter(MP-1000)로 출력시킨다. 측정된 데이터는 30회의 평균화를 행하고, 전달함수를 구해서 커브 피트에 의해 모드 파라미터를 추정하였다.

5. 컴퓨터 시뮬레이션에 의한 모드 파라미터의 변화에 따른 안정타점영역에 대한 고찰

Model Reference로 설정한 테니스 라켓을 가진 실험하여 얻은 모드 파라미터로부터 전달함수를 계산하고 각 측정점에서의 전달함수로 부터 고유진동수를 구하여 안정타점영역을 계산하였다.

이제 모드 파라미터중에서도 안정타점영역에 가장 큰 영향을 미치는 등가강성의 변화에 따른 안정타점영역의 변화를 살펴보자.

경우 1) 등가강성만 증가시켰을 때

다른 파라미터는 고정시킨 상태에서 등가강성만을 기준치의 2% 씩 증가시켜서 시뮬레이션을 한 결과를

Table 1에 나타내었다. 그 내용을 살펴보면 2차, 3차 모드의 고유진동수가 등가강성의 증가에 따라 점점 고주파쪽으로 이동하였고, 안정타점영역은 Fig.7에서 보는 것처럼 점점 증가하는 것을 볼 수 있다. 세부적으로 A1, A2 & B의 값의 변화를 살펴보면 Fig.8에서 보는 것처럼 B는 계속 증가하는 추세를 보였고 A1과 A2는 No.4(Kr:+6%)에서 최대치를 보이고 점차 감소하는 경향을 보였다. A1과 A2는 최대치 이후에서 점차 감소하는 경향이지만 B값의 영향때문에 안정타점영역은 계속 증가하였다. 이것으로 미루어 볼때 등가강성을 증가시키면 테니스 라켓의 비틀림 진동이 많이 억제됨을 알 수 있다.

경우 2) 등가강성만 감소시켰을 때

다른 파라미터는 고정시킨 상태에서 등가강성만을 기준치의 2% 씩 감소시켜서 시뮬레이션한 결과를 Table 2에 나타내었다. 2차, 3차 모드의 고유진동수가 등가강성이 감소함에 따라 점점 저주파쪽으로 이동하였고

안정타점영역은 Fig.9에서 보는 것처럼 점차 증가하다가 No.5(Kr:-8%)에서 최대값을 보이고, 그 이후에는 점차 감소하는 추세를 보였다. 세부적으로 A1, A2 & B의 값의 변화를 살펴보면, Fig.10에서 보는 것처럼 등가강성이 감소함에 따라서 점점 증가하다가 B는 No.5(Kr:-8%)에서 A1과 A2는 No.6(Kr:-10%)에서 최대치를 보이고 다시 감소하는 경향을 나타내었다.

경우 3) 등가강성은 감소시키고 등가감쇠는 증가시켰을 때

테니스 라켓의 안정타점영역을 넓히기 위해서는 강성을 높이는 방법도 생각해 볼 수 있으나, 라켓의 재질의 특수성과 일반적으로 강성을 높이면 감쇠가 적어져서(예: Steel Racket) 라켓의 진동이 손에 그대로 전달되어 테니스 엘보우 등 나쁜 영향을 끼치기 쉬우므로 본 논문에서는 강성을 줄이고 감쇠를 키우는 쪽에 관심을 두고 시뮬레이션을 행하였다. 등가강성은 기준치의 2% 씩 감소시키는 반면, 등가감쇠는 기준치의 2% 씩 증가시켜서 시뮬레이션한 결과를 Table 3에 나타내었다. 고유진동수의 변화를 보면, 등가강성의 영향으로 2차, 3차 모드의 고유진동수가 점점 저주파쪽으로 움직이는 것을 알 수 있다. 안정타점영역의 변화는 Fig.11의 그래프에서 보는 것처럼 점점 증가하다가 No.5(Kr:-8%, Cr:+8%)에서 최대값을 보이고(Fig.13 참조). 그 이후에는 점차 감소하는 추세를 보았다. 세부적으로 안정타점영역을 표현하는 요소 A1, A2 & B의 값을 살펴보면, Fig.12의 그래프에서 보는 것처럼 B는 No.5(Kr:-8%, Cr:+8%)에서, A1과 A2는 No.6(Kr:-10%, Cr:+10%)에서 최대치를 보이고 점차 감소하는 경향을 보였다. 여기에서 특기할 사항은 A1, A2의 변화율 보다 B의 변화율이 훨씬 크기때문에 전체적인 안정타점영역의 변화율도 B의 변화율에 크게 의존하고 있다는 점이다. 그리고 경우 2)와 비교해 볼때 등가감쇠의 증가로 인해 대체로 안정타점영역은 경우 2)보다 증가하였지만 그 경향은 비슷한 것으로 나타났다. 따라서 안정타점영역의 변화에 가장 큰 영향을 미치는 요소는 바로 등가강성이며, 주로 2차 모드(비틀림 진동)의 크기에 따라 좌우됨을 알 수 있다.

6. 결 론

모드 파라미터의 변화에 따른 안정타점영역에 대한 컴퓨터 시뮬레이션을 행하여 얻어진 결과를 정리하면 다음과 같다.

(1) 테니스 라켓의 등가강성을 변화시킴으로써 진동특성(특히, 비틀림 진동)에 큰 변화를 가져왔다.

첫째, 등가강성을 증가시킨 경우에는 비틀림 진동의 지속적인 감소에 따라 안정타점영역은 계속 증가하는 추세를 보였다.

둘째, 등가강성을 감소시킨 경우에는 안정타점영역

역은 계속 증가하다가 Modal Reference로 선정된 라켓의 증가감성을 약 8% 정도 감소시켰을 때 최대치를 보이고 점차 감소하는 경향을 보였다.

(2) 증가감성은 감소시키면서 증가감쇠는 증가시켰을 경우에는, 증가감쇠의 증가에 따른 영향으로 안정타점 영역은 대체로 증가하였지만 증가감성의 영향을 크게 받아 증가감성만 감소시킨 경우와 비슷한 추세였고 Modal Reference로 선정된 라켓의 증가감성을 약 8% 정도 감소시키고, 증가감쇠를 약 8% 정도 증가시켰을 때 최대치를 보이고 점차 감소하는 경향을 보였다.

(3) 모두드 파라미터의 변화에 따르는 안정타점영역의 변화를 컴퓨터 그래픽을 통해서 시각적으로 나타낼 수 있었고, 테니스 라켓의 동특성을 개선할 수 있는 엔지니어링 파라미터를 찾아내는 CAD화에 좋은 자료를 얻을 수 있었다.

7. 참고 문헌

1. 임연택, "다차원 스펙트럼해석에 의한 테니스 라켓의 동특성에 관한 연구", 한양대학교 석사학위논문, 1984.
2. Jae Eung OH and Sung Ha YUM, "A Study to Identify the Dynamic Characteristics of the

Tennis Racket by Modal Analysis", Trans. of JSME, Vol.51, No.471, pp.2966-2973, Nov. 1985.

3. Jae Eung OH, Yun Taek LIM and Sung Ha YUM, "An Estimation of Power Contribution on Tennis Racket by Multi-Dimensional Spectral Analysis", Trans. of JSME, Vol.51, No.471, pp.2974-2979, Nov. 1985.
4. T.R.Kane, W.C.Hayes and J.D.Priest, "Experimental determination of forces exerted in tennis play", Biomechanics IV, pp.284-290, 1974.
5. J.S.Bendat and A.G.Piersol, Engineering applications and spectral analysis, John Wiley & Sons, Inc., 1980.
6. 오재음, CAE (Computer Aided Engineering)을 위한 구조물 모두드해석의 기초와 응용, 의성출판사, 1985.
7. Herbert Hatze, "Forces and duration of impact, and grip tightness during the tennis stroke", MEDICINE AND SCIENCE IN SPORTS, Vol.8, pp88-95, 1976.
8. Toshihiko Watanabe, Yasuo Ikegami and Mitsumasa Miyashita, "Tennis the effects of grip firmness on ball velocity after impact", MEDICINE AND SCIENCE IN SPORTS, Vol.11, No.4, pp.359-360, 1979.

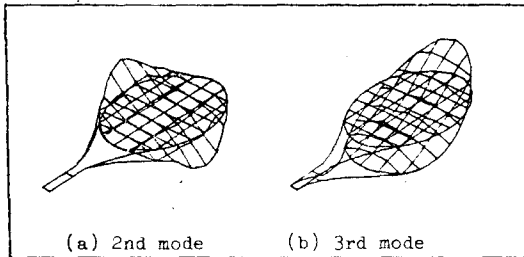


Fig.1 Mode shapes of tennis racket

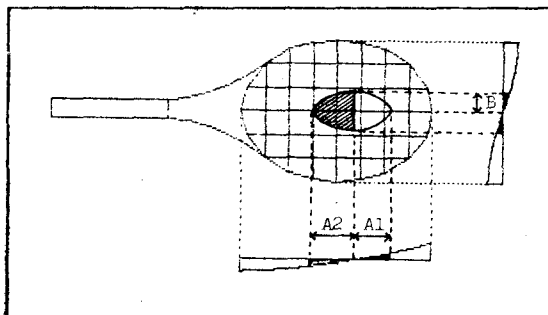


Fig.2 Definition of sweet spot

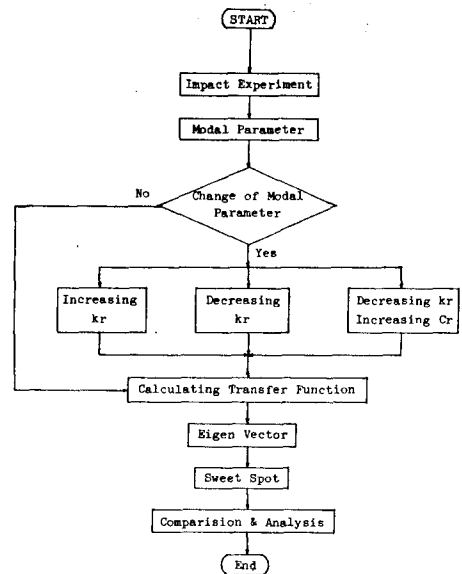


Fig.3 Flow Chart of Determination of Sweet Spot due to the Change of Modal Parameter.

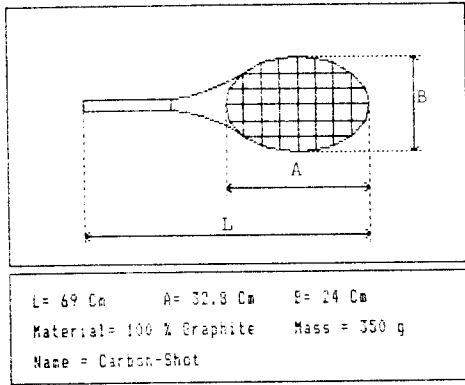


fig.4 Tennis racket of model reference

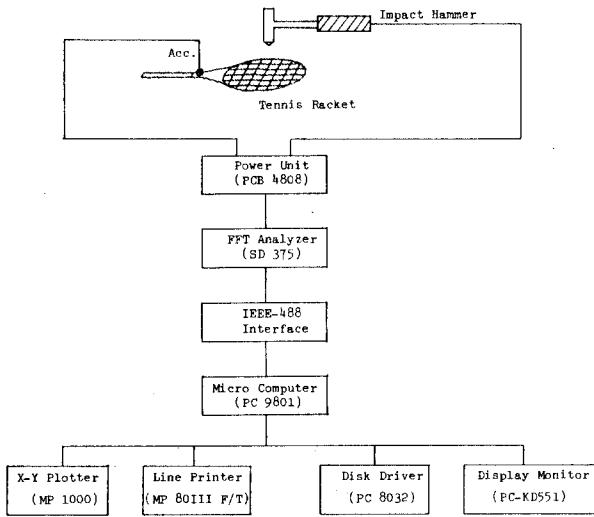


Fig.5 Schematic Diagram of Experimental System.

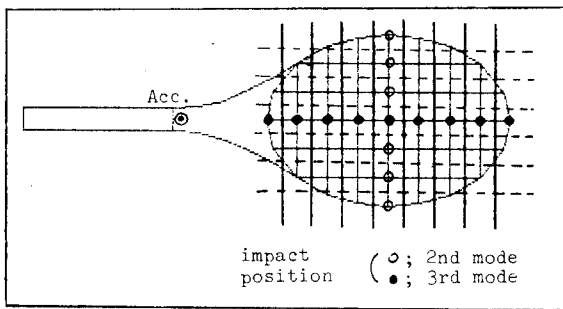


Fig.6 The division for measuring the modal parameter
 (—; for bending, - - - -; for torsion)

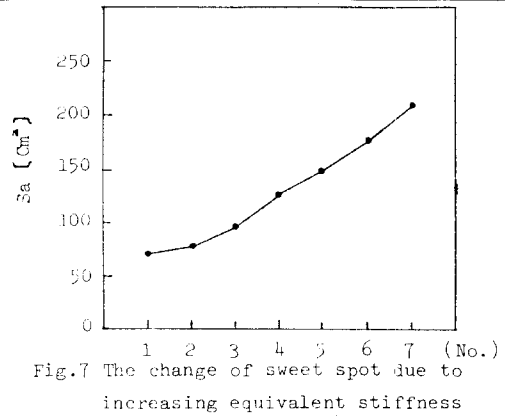


Fig.7 The change of sweet spot due to increasing equivalent stiffness

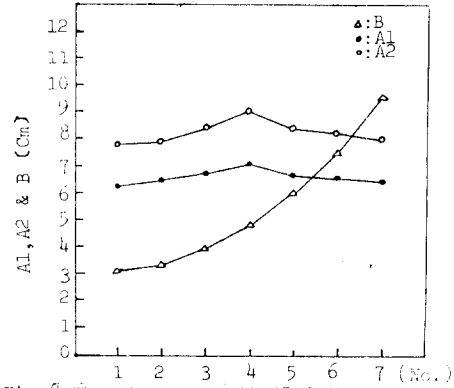


Fig.8 The change of A1, A2 & B due to increasing equivalent stiffness

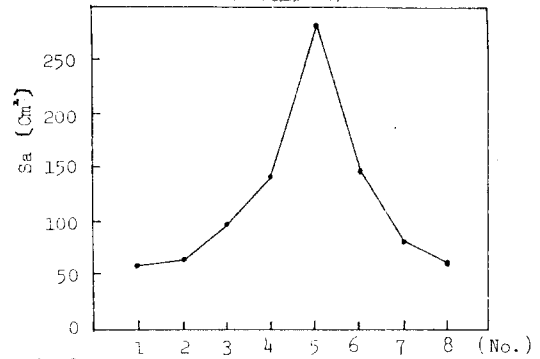


Fig.9 The change of sweet spot due to decreasing equivalent stiffness

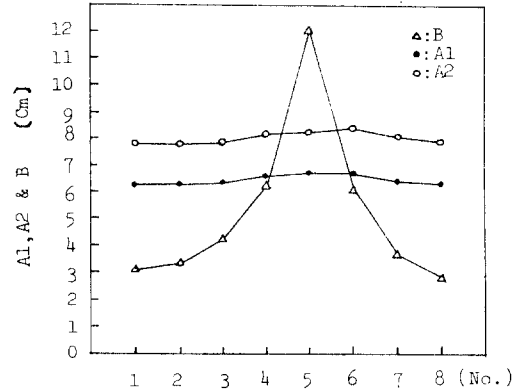


Fig.10 The change of A1, A2 & B due to decreasing of equivalent stiffness

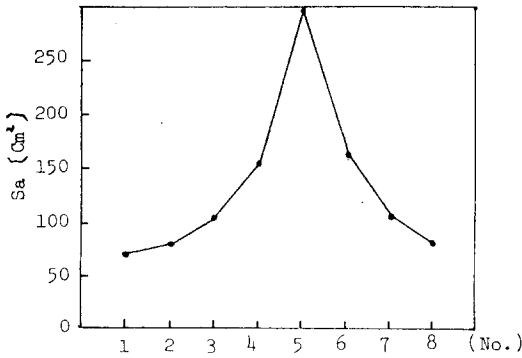


Fig. 11 The change of sweet spot due to decreasing equivalent stiffness & increasing equivalent damping

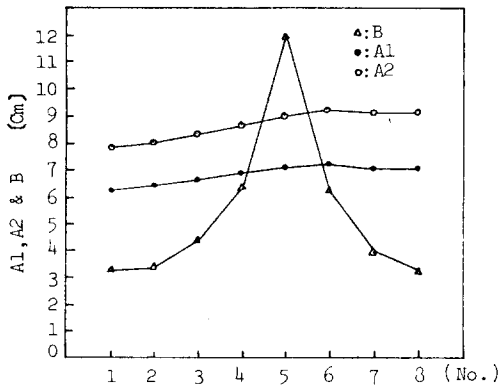


Fig. 12 The change of A1, A2 & B due to decreasing of equivalent stiffness & increasing of equivalent damping

Table 1 The result of simulation due to increasing equivalent stiffness

No.	Kr 의 변화 (%)	고유진동수 (Hz)		안정비점영역				
		2차모우드	3차모우드	B (cm)	A1 (cm)	A2 (cm)	Sa (cm²)	Ta/Sa (%)
1	기 준	110	185	3.15	6.3	7.8	69.77	12.73
2	+ 2%	111	187	3.35	6.5	8.0	76.30	13.92
3	+ 4%	112	189	3.95	6.8	8.5	94.93	17.32
4	+ 6%	113	191	4.85	7.1	9.1	123.47	22.53
5	+ 8%	114	192	6.05	6.7	8.5	144.45	26.36
6	+10%	115	194	7.55	6.6	8.3	176.71	32.25
7	+12%	116	196	9.45	6.5	8.1	216.72	39.55

Sa ; Area of sweet spot (cm²)

Ta ; Total area of gut part (cm²)

Table 2 The result of simulation due to decreasing equivalent stiffness

No.	Kr 의 변화 (%)	고유진동수 (Hz)		안정비점영역				
		2차모우드	3차모우드	B (cm)	A1 (cm)	A2 (cm)	Sa (cm²)	Ta/Sa (%)
1	기 준	110	185	3.15	6.3	7.8	69.77	12.73
2	- 2%	109	183	3.35	6.3	7.8	74.20	13.54
3	- 4%	108	181	4.25	6.4	7.9	95.47	17.42
4	- 6%	107	179	6.25	6.5	8.1	143.34	26.16
5	- 8%	106	178	12	6.6	8.2	278.97	50.91
6	-10%	104	176	6.15	6.7	8.4	145.87	26.62
7	-12%	103	174	3.65	6.5	8.1	83.71	15.28
8	-14%	102	172	2.85	6.4	7.9	64.02	11.68

Sa ; Area of sweet spot (cm²)

Ta ; Total area of gut part (cm²)

Table 3 The result of simulation due to decreasing equivalent stiffness and increasing damping

No.	Kr, Cr 의 변화		고유진동수 (Hz)		안정비점영역				
	Kr	Cr	2차모우드	3차모우드	B (cm)	A1 (cm)	A2 (cm)	Sa (cm²)	Ta/Sa (%)
1	기 준	기 준	110	185	3.15	6.3	7.8	69.77	12.73
2	- 2%	+ 2%	109	183	3.35	6.4	8.0	75.78	13.83
3	- 4%	+ 4%	108	181	4.35	6.6	8.3	101.81	18.58
4	- 6%	+ 6%	107	179	6.35	6.8	8.6	153.61	28.03
5	- 8%	+ 8%	106	178	11.95	7.0	8.9	298.46	54.46
6	-10%	+10%	104	176	6.25	7.2	9.2	161	29.38
7	-12%	+12%	103	174	3.95	7.1	9.1	100.52	18.34
8	-14%	+14%	102	172	3.25	7.1	9.1	82.7	15.1

Sa ; Area of sweet spot (cm²)

Ta ; Total area of gut part (cm²)

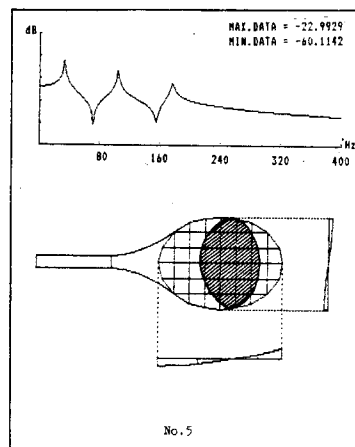
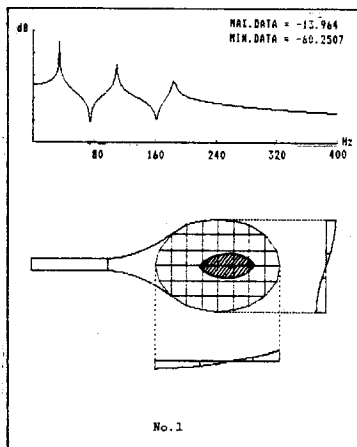


Fig. 13 The comparison of the transfer function & the sweet spot for No.1 & No.5 in case 3