

<論 文>

# 테니스 라켓의 안정타점영역의 확장을 위한 CAD화에 관한 연구

오재응\* · 박 호\*\* · 홍하윤\*\* · 염성하\*

(1987년 9월 9일 접수)

## A Study on the CAD for Extension of Sweet Spot of the Tennis Racket

Jae Eung Oh, Ho Park, Ha Yoon Hong and Sung Ha Yum

**Key Words:** Vibration(진동), Modal Analysis(모우드해석), Impact(가진), Sweet Spot(안정타점영역), Structural Modification(구조변경), Transfer Function(전달함수) Modal Parameter(모우드파라미터)

### Abstract

The dynamic characteristics of a tennis racket were identified by experimental modal analysis and the sweet spot due to these was calculated. A tennis racket was selected as a model reference and modal parameters of the racket were estimated from the transfer function measured by experiment. The transfer function was reconstructed by the modified modal parameters on the assumption that the racket was locally modified, for example, a change in the material of the frame and the attachment of a damping material to the grip. The change of the dynamic characteristics, especially natural frequency and magnitude of the second and the third vibrational modes, were evaluated from the reconstructed transfer function. The change of the sweet spot due to the modified modal parameters was estimated and visualized through computer graphic simulation by the criterion of the sweet spot measured before structural modification. The modal parameters for improvement of the dynamic characteristics and the data for CAD were obtained.

### 1. 서 론

최근, 테니스 인구의 증가에 따라 테니스 라켓의 제작기술도 상당한 수준에 이르렀고 설계제작의 자동화에 의해서 양질의 제품이 시판되고 있다.

그러나 라켓에 볼이 임팩트될 때 발생하는 진동으로 야기되는 테니스엘보우 등, 해결해야 할 문제가 아직도 남아 있다. 이러한 문제들을 해결하기 위해서는 테니스 라켓의 정적인 강도 뿐만 아니라 동적인 특성도 고려하지 않으면 안된다. 따라서 볼 컨트롤을 용이하게 하고, 또한 안정타점영역(sweet spot)의 확장과 그립부의 진동에 의해서 발생하는 엘보우 현상을 방지하기 위해서 여러가지의 연구가 수행되어 왔다<sup>(1,2)</sup>.

\* 정회원, 한양대학교 공과대학 정밀기계공학과

\*\* 한양대학교 대학원

저자들은, 다차원스펙트럼해석과 음향인텐시티법 및 모우드해석법에 의해 그림부에 미치는 진동원의 규명  
과 라켓의 동적거동에 대해서 연구하였다<sup>(3-5)</sup>. 특히, 라켓의 제질변경과 그림부의 구조변경에 의한 안정타  
점영역에 영향을 미치는 모우드파라미터의 추정에 관  
한 연구도 수행하였다<sup>(6)</sup>. 이러한 연구들은 결국 안정  
타점영역을 확장시키거나 테니스엘보우를 방지하기 위  
한 것이다. 따라서 이러한 목적을 달성하기 위해 테니  
스 라켓의 진동 모우드에 관계되는 파라미터를 규명하  
고 그 모우드파라미터의 변화에 따르는 진동동성에 대  
해서 연구할 필요가 있다.

본 연구에서는 실험적인 모우드해석법을 실제의 테  
니스 라켓에 적용하여 모우드파라미터를 구한 다음,  
그 파라미터의 변화에 따르는 안정타점영역의 변화를  
컴퓨터 시뮬레이션을 통해서 예측하였다. 또한 안정타  
점영역을 확장시키고 라켓의 동특성을 개선시킬 수 있  
는 모우드파라미터를 찾아서 라켓의 설계제작단계에  
정보를 제공하는 테니스 라켓의 CAD(Computer Aided  
Design)화를 위한 자료 획득을 목적으로 한다.

2. 구조변경에 있어서 모우드파라미터의 산출

모우드합성법은, 컷벳팅에 의해서 얻은 모우드파  
라미터만의 조작에 의해 새로운 구조계의 모우드파라  
미터를 구하는 수법이다. 이 수법은 유한요소가 물리  
좌표계에 관해서 정식화 되는 것에 반하여 모우드좌표  
계에 있어서의 해석을 다루고 있다. 모우드합성법은  
유한요소법의 장점과 모우드해석법의 편리함을 동시에  
이용한 것이다.

2.1 모우드좌표에 의한 운동방정식

해석하고자 하는 계 또는 대상의 기계구조물을 비례  
점성감쇠계로 가정했을 때, 다자유도계의 운동방정식  
 $[M]\{\ddot{x}\} + [C]\{\dot{x}\} + [K]\{x\} = \{f\}$  (1)  
에 있어서, 고유치해석(또는 실험)에 의해서  $n$ 차 까  
지의 모우드파라미터를 구할 수 있다. 여기서,  $[M]$ ,  
 $[C]$ ,  $[K]$ 는 각각 질량, 감쇠, 강성매트릭스  $\{x\}$ ,  $\{f\}$   
는 변위 및 외력벡터이다.

모우드매트릭스는  $m$ 개의 응답평가점과  $n$ 개의 고유  
진동수로 부터

$$[\psi] = \begin{bmatrix} \psi_{11} & \psi_{12} & \dots & \psi_{1n} \\ \psi_{21} & \psi_{22} & \dots & \psi_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \psi_{m1} & \psi_{m2} & \dots & \psi_{mn} \end{bmatrix} \quad (2)$$

로 된다. 다음에 모우드매트릭스와 신좌표계  $\{z\}$ 를 이

용하여  $\{x\}$ 를 나타내면

$$\{x\} = [\psi]\{z\} \quad (3)$$

라고 놓을 수 있다. 이것은 모우드중첩의 원리를 사용  
한 것으로  $\{z\}$ 는 각 모우드의 기여도를 나타내는 것이  
라고 생각하면 된다.

이 식(3)을 식(1)에 대입하고, 좌로부터  $[\psi]^T$ 를 곱  
하면

$$[\psi]^T[M][\psi]\{\ddot{z}\} + [C][\psi]\{\dot{z}\} + [\psi]^T[K]\{z\} = [\psi]^T\{f\} \quad (4)$$

로 된다. 여기서 좌변 제 1 항을 보면

$$[\psi]^T[M][\psi] = \underbrace{\Gamma}_{n \times m} \underbrace{m}_{m \times m} \underbrace{m}_{m \times n} \underbrace{N}_{n \times n} \quad (5)$$

로 되고, 같은 방법으로 제 2, 3 항도

$$[\psi]^T[C][\psi] = \underbrace{\Gamma}_{n \times m} \underbrace{c}_{m \times n} \quad (6)$$

$$[\psi]^T[K][\psi] = \underbrace{\Gamma}_{n \times m} \underbrace{k}_{m \times n} \quad (7)$$

로 되어, 결국 식(4)는

$$\underbrace{\Gamma}_{n \times m} \underbrace{m}_{m \times n} \{\ddot{z}\} + \underbrace{\Gamma}_{n \times m} \underbrace{c}_{m \times n} \{\dot{z}\} + \underbrace{\Gamma}_{n \times m} \underbrace{k}_{m \times n} \{z\} = [\psi]^T\{f\} \quad (8)$$

로 변환할 수 있다. 이것에 의해 원래의 무한개의 자  
유도는 계산된 고유진동 모우드의  $n$ 자유도의 방정식  
으로 축소되었다.

다음에 식(8)에 있어서

$$[\bar{\psi}] = [\psi] \left[ \underbrace{\Lambda}_{n \times n} \right] \quad (9)$$

의 변환(진동모우드의 모우드질량에 의한 정규화)을  
행하면

$$\underbrace{\Gamma}_{n \times m} \underbrace{I}_{m \times n} \{\ddot{z}\} + \underbrace{\Gamma}_{n \times m} \underbrace{2\zeta}_{m \times n} \{\dot{z}\} + \underbrace{\Gamma}_{n \times m} \underbrace{\omega_r^2}_{m \times n} \{z\} = [\bar{\psi}]^T\{f\} \quad (10)$$

로 변환할 수 있다.

2.2 구조의 부분적 변경

원래의 구조물에 부분적변경  $[\Delta M]$   $[\Delta C]$   $[\Delta K]$ 를  
가하면 식(1)은

$$[M + \Delta M]\{\ddot{x}\} + [C + \Delta C]\{\dot{x}\} + [K + \Delta K]\{x\} = \{f\} \quad (11)$$

로 된다. 변경전의 고유모우드  $[\psi]$ 를 이용하여 모우드  
좌표계로 변환하면

$$\underbrace{[\underbrace{\Gamma}_{n \times m} I + [\bar{\psi}]^T[\Delta M][\bar{\psi}]}_{\bar{M}}]}_{\bar{M}} \{\ddot{z}\} + \underbrace{[\underbrace{\Gamma}_{n \times m} 2\zeta + [\bar{\psi}]^T[\Delta C][\bar{\psi}]}_{\bar{C}}]}_{\bar{C}} \{\dot{z}\} + \underbrace{[\underbrace{\Gamma}_{n \times m} \omega_r^2 + [\bar{\psi}]^T[\Delta K][\bar{\psi}]}_{\bar{K}}]}_{\bar{K}} \{z\} = [\bar{\psi}]^T\{f\} \quad (12)$$

로 되어, 고유진동수는

$$|\lambda^2[\bar{M}] + \lambda[\bar{C}] + [\bar{K}]| = 0 \quad (13)$$

의 고유진동해석으로 부터, 그 고유치를  $\lambda_r = \sigma_r + j\omega_r$ 로 하면 구조변경 후의 고유모우드는

$$[-\lambda_r^2[\bar{M}] + \lambda_r[\bar{C}] + [\bar{K}]]\{u_r\} = 0 \quad (14)$$

에서 구할 수 있다. 따라서 원래의 물리좌표계에 있어서의 모우드는

$$\{x\} = \{\bar{\psi}\}\{u_r\} \quad (15)$$

로 결정되어, 부분적변경에 의한 상태변화를 간단히 파악할 수 있다. 여기에서  $\{u_r\}$ 은 변경후의 고유벡터를 나타낸다. 또 이 수법을 최적구조물의 탐색에 사용하는 것도 가능하다.

이 수법을 테니스 라켓에 적용하여 최적한 모우드파라미터의 탐색을 위한 컴퓨터시뮬레이션을 행하였다. 테니스 라켓을 비례점성감쇠계로 가정하고, 각 측정점에 있어서의 진동모우드의 선형결합 및 직교성을 이용하여 모우드파라미터에 의한 계의 응답과 외력간의 식을 쓰면

$$\{x\} = \sum_{r=1}^n \frac{\{\bar{\psi}_r\} \{\bar{\psi}_r\}^T}{-\omega^2 m_r + j\omega c_r + k_r} \{f\} \quad (16)$$

로 된다. 식(16)을 매트릭스표현으로 나타내면 다음과 같이 된다.

$$\begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ \vdots \\ X_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{11} & H_{12} & \dots & H_{1n} \\ H_{21} & H_{22} & \dots & H_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ H_{n1} & H_{n2} & \dots & H_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ \vdots \\ F_n \end{bmatrix} \quad (17)$$

여기서 가진점  $j$ 와 측정점  $i$ 에서의 전달함수  $H_{ij}$ 는 다음과 같다.  $g$

$$H_{ij} = \frac{X_i}{F_j} = \sum_{r=1}^n \frac{\bar{\psi}_{ir} \bar{\psi}_{jr} / m_r}{-\omega^2 + \omega_r^2 + j2\zeta_r \omega \omega_r} \quad (18)$$

(단,  $\omega$  = 가진주파수,  $\omega_r$  = 고유진동수)

본 연구에서는, 측정된 전달함수를 커브피팅하여 모우드파라미터 ( $\omega_r, \zeta_r, m_r, c_r, k_r, \{\bar{\psi}_r\}$  등)를 추정하고 모우드파라미터의 부분적 변경에 따른 전달함수를 계산하여 진동특성의 변화를 평가하였다. 또한 진동특성의 변화에 따른 안정타점영역의 변화를 계산하고 컴퓨터 그래픽을 통하여 가시적으로 표현하였다.

### 3. 테니스 라켓의 안정타점영역의 결정

#### 3.1 안정타점영역의 정의

안정타점영역은 라켓과 볼의 충돌시 거트내에 형성되는 폐공간으로서 비틀림 진동이나 굽힘진동이 적어 임팩트되는 순간에 손에 전달되는 느낌이 좋은 부분이다. 보통 임팩트 상에 있어서의 안정타점영역은 손에 전달되는 충격 또는 진동이 적고 거트의 반발성이 좋

은 곳으로 정한다. 그러나 안정타점영역에 대한 정의는 아직 명확하게 되어 있지 않고, 다음과 같은 사항이 일반적으로 알려져 있다.

(1) 라켓의 각 면상에서 볼의 반발계수를 측정하여 거기서 최대값을 갖는 곳

(2) 라켓에 볼이 임팩트된 경우, 그림을 잡고 있는 손에 아무 충격도 느껴지지 않는 곳

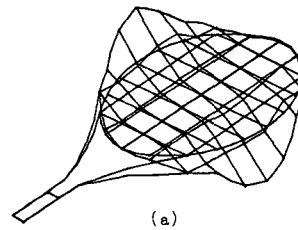
(3) 볼을 때린 직후, 라켓의 거트는 진동을 하게 되는데, 그 진동이 최소로 되는 곳

본 연구에서는 위의 정의내용 가운데서 (3)의 진동의 크기에 의한 안정타점영역의 정의로부터 그 영역을 결정하였다. 안정타점영역에 영향을 미치는 요소는 여러 가지가 있겠으나 진동의 측면에서만 고찰한다면, 그림부의 감쇠물질의 부가 및 재질변경등에 의한 라켓자체의 진동특성의 변화에 따라서 볼과 라켓이 충돌할 때 발생하는 최초의 진동의 크기가 작을수록, 최초의 진동후에 감쇠가 클수록 라켓의 안정타점영역의 확장에 영향을 미친다고 생각한다.

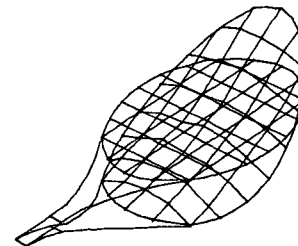
#### 3.2 안정타점영역의 선정기준과 표현

본 논문에서 안정타점영역을 선정하는 기준은 Fig. 1과 같이 2차 모우드(비틀림진동), 3차 모우드(2차 굽힘진동)의 절점(nodal line)을 고려하여 진동이 적은 곳을 선정하였다.

즉 Fig. 2와 같이 라켓의 진동을 측면에서 보았을 때 2차, 3차 진동 모우드에 있어서 최대진동 크기의 약 40%에 해당하는 부분내로 결정하였다. 이때 2차진



(a)



(b)

(a) 2nd mode (b) 3rd mode

Fig. 1 Mode shapes of tennis racket

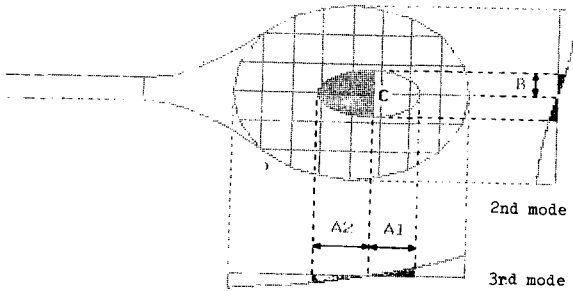


Fig. 2 Definition of the sweet spot

Table 1 Elliptical equation of the sweet spot

	Elliptical equation	Definition domain
Right ellipse	$(\frac{X}{A1})^2 + (\frac{Y}{B})^2 = 1$	$X \geq C$
Left ellipse	$(\frac{X}{A2})^2 + (\frac{Y}{B})^2 = 1$	$X \leq C$

동 모드에서의 B의 값과 3차진동 모드에서의 A1, A2의 값을 찾아서 2차 3차 진동 모드의 절점이 교차하는 점 C를 중심으로 하는 2개의 반타원이 이루는 폐공간을 안정타점영역으로 표현하여, 모드파라미터의 변화에 따르는 안정타점영역의 변화를 예측하였다. Table 1은 안정타점영역을 결정하는 타원방정식을 나타내고 있다.

### 3.3 모드 파라미터의 변화에 따르는 안정 타점영역의 예측

가진실험에 의하여 측정된 전달함수로부터 모드파라미터를 추정하고, 이 추정된 모드파라미터를 이용하여 모델레퍼런스의 라켓에 대한 전달함수를 재구성한다. 이 전달함수의 허수부를 이용하여 각 측정점에서의 고유벡터를 구하고, 이 고유벡터의 값을 이용해서 진동 모드의 형태를 구한 다음 앞에서 설명한 선정기준에 의거 안정타점영역을 결정하게 되는데, 이때 모드파라미터의 변화에 의해 전달함수도 달라지게 될 것이다. 곧 모드파라미터의 변화가 한정타점영역에 변화를 끼치게 된다.

본 연구에서는 변경된 모드파라미터에 따른 한정타점영역의 변화를 구조변경이전의 한정타점영역을 기준으로 컴퓨터시뮬레이션을 통하여 예측하였고, 그 영역을 확장하기 위해서는 모드파라미터를 어떻게 변화시켜야 할 것인가에 대한 고찰을 행하였다. Fig. 3은 본 연구의 흐름도를 나타내고 있다.

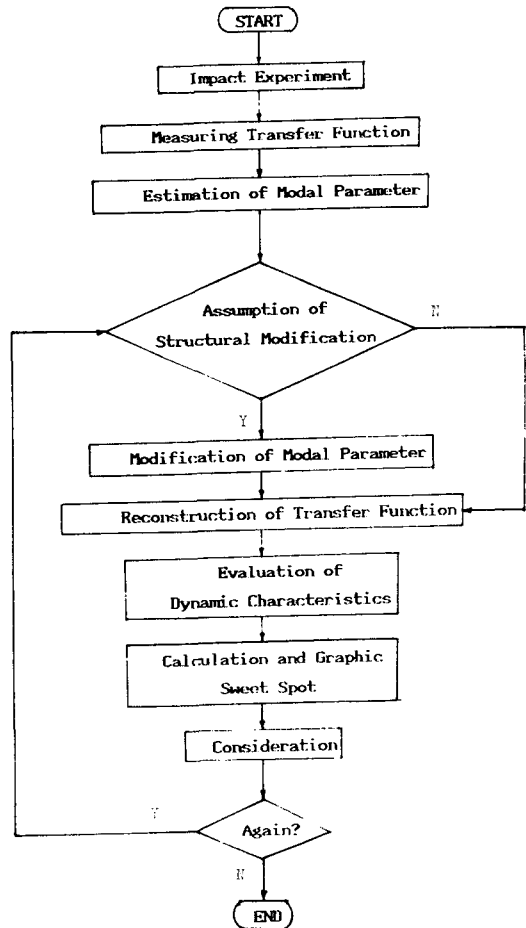


Fig. 3 Flowchart of determination of the sweet spot due to the change of modal parameters

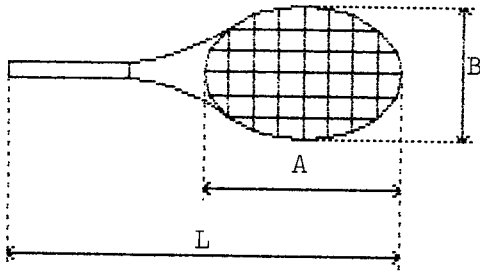
## 4. 실험방법 및 데이터처리

### 4.1 실험장치 및 방법

본 연구에서는 Fig. 4의 라켓을 모델레퍼런스(model reference)로 해서 가진 실험을 행하였다.

실험방법으로는 실제의 rack-hand system과 비슷한 지지대를 이용하여 테니스 라켓을 고정시킨 후 라켓의 푸레임부와 거트부를 임팩트햄머(PCD 4808 Unit)로 가진하면서 그때 발생하는 진동을 가속도픽업(Rion PV-90 A)을 이용하여 측정하였다.

가진점과 가속도픽업의 위치는 Fig. 5에 보인 것과 같이 라켓의 2차 및 3차 모드의 모드파라미터를 추정하기 위해서 비틀림 및 굽힘진동을 서로 독립된 계로 취급하여, 각각 비틀림방향으로는 7부분, 굽힘



$L=69\text{ Cm}$   $A=32.8\text{ Cm}$   $B=24\text{ Cm}$   $\text{Mass}=350\text{ g}$   
 Material=100% graphite Name=Carbon Shot  
 Manufacturing Co.=Hanil racket Co. Ltd.

Fig. 4 The tennis racket of a model reference

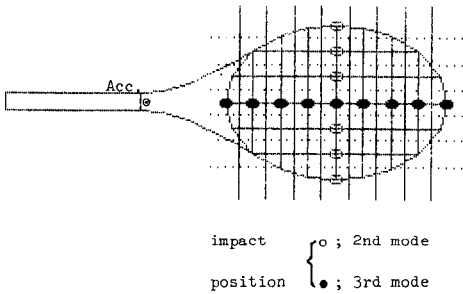


Fig. 5 Division of the tennis racket for measuring transfer functions  
 (— ; for bending, ---- ; for torsion)

방향으로는 9부분으로 나누어 전달함수를 측정하였다. 테니스 라켓은 표준 사이즈를 이용하였고, 거트의 장력은 실제로 많이 사용하고 있는 약 32 kgf의 장력으로 고정하여 실험을 실시하였다.

4.2 측정계 및 데이터처리

본 연구에 이용한 측정계 및 데이터처리의 블록선도를 Fig. 6에 보였다. 임팩트해머에 의해서 테니스 라켓을 가진할 때 발생하는 힘과 가속도의 신호는 F.F.T. 해석(SD-375)에 의해 애널로그신호가 디지털신호로 변환되며 IEEE-488 인터페이스버스에 의해 마이크로컴퓨터(NEC, PC-9801 F)에 전송 입력된다. 입력된 데이터는 여러가지 계산과정을 수행한 후, 그 결과를 X-Y 플로터(MP-1000)로 출력시킨다. 측정된 데이터는 32회의 평균화를 행하고, 전달함수를 구해서 커브 피팅에 의해 모우드파라미터를 추정하였다.

5. 컴퓨터시뮬레이션에 의한 모우드파라미터의 변화에 따르는 안정타점영역에 대한 고찰

모델레퍼런스로 선정한 테니스 라켓을 가진 실험하여 얻은 모우드파라미터로부터 전달함수를 계산하고 각 측정점에서의 전달함수로부터 고유벡터를 구하여

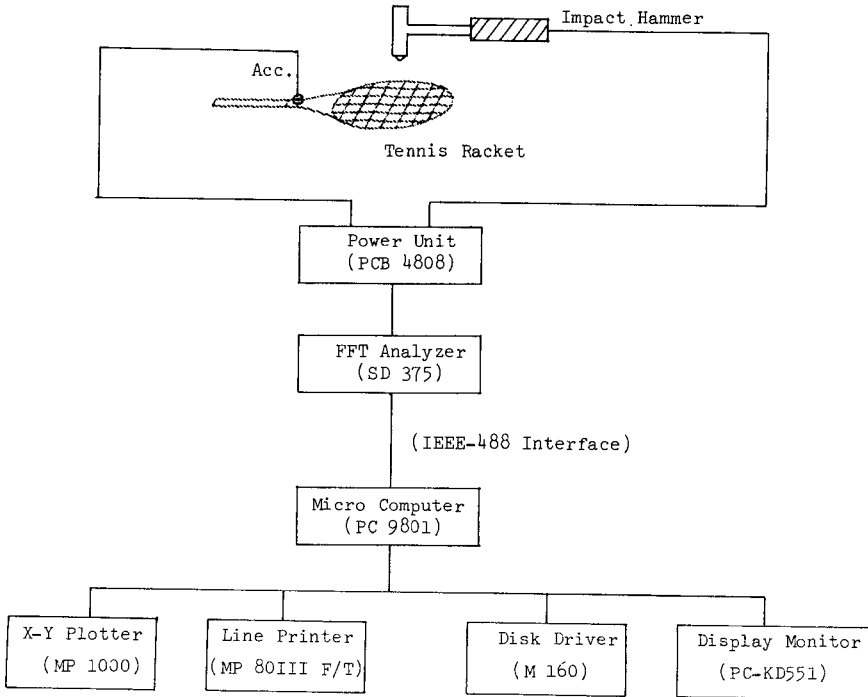


Fig. 6 Schematic diagram of the experimental system

Table 2 The results of simulation due to increasing equivalent stiffness

Change $k_r$	Natural frequency (Hz)		Sweet spot				
	2nd mode	3rd mode	$B$ (Cm)	$A1$ (Cm)	$A2$ (Cm)	$Sa$ (Cm <sup>2</sup> )	$Sa/Ta$ (%)
0%	110	185	3.15	6.3	7.8	66.77	12.73
+2%	111	187	3.35	6.5	8.0	76.30	13.92
+4%	112	189	3.95	6.8	8.5	94.93	17.32
+6%	113	191	4.85	7.1	9.1	123.47	22.53
+8%	114	192	6.05	6.7	8.5	144.45	26.36
+10%	115	194	7.55	6.6	8.3	176.71	32.25
+12%	116	196	9.45	6.5	8.1	216.72	39.55

$Sa$  ; Area of sweet spot(Cm<sup>2</sup>)

$Ta$  ; Total area of gut(Cm<sup>2</sup>)

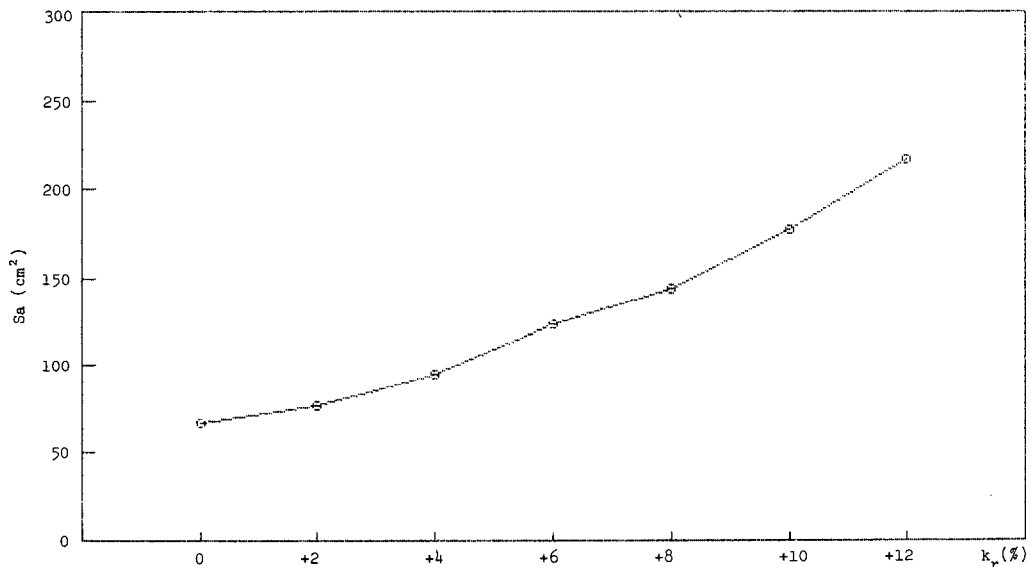


Fig. 7 The change of sweet spot due to increasing equivalent stiffness

안정타점영역을 계산하였다. 여기서 모우드파라미터중에서도 안정타점영역에 가장 큰 영향을 미치는 등가강성의<sup>(6)</sup> 변화에 따르는 안정타점영역의 변화를 살펴 보자.

### 5.1 등가강성만 증가시켰을 때

다른 파라미터는 고정시킨 상태에서 각차 모우드의 등가강성[식(16)에 있어서의  $k_r$ ]만을 기준치(원래의 제)의 2%씩 증가시켜서 시뮬레이션을 실시한 결과를 Table 2에 나타내었다.

그 내용을 살펴보면 2차 및 3차 모우드의 고유진동수가 등가강성의 증가에 따라 점점 고주파쪽으로 이동하였고, 안정타점영역은 Fig. 7에서 보는 것처럼 점

점 증가하는 것을 볼 수 있다. 세부적으로  $A1$ ,  $A2$  &  $B$ 의 값의 변화를 살펴보면 Fig. 8에서 보는 것처럼  $B$ 는 계속 증가하는 추세를 보였고  $A1$ 과  $A2$ 는 등가강성을 6% 증가시켰을 때 최대치를 보이고 점차 감소하는 경향을 보였다.  $A1$ 과  $A2$ 는 최대치 이후에서 점차 감소하는 경향이 있지만  $B$ 값의 영향이 크기 때문에 안정타점영역은 계속 증가하였다. 이것으로 미루어 볼 때 등가강성의 증가에 의하여 안정타점영역을 확장할 수 있으며, 특히 굽힘진동에 비하여 비틀림진동을 효과적으로 억제할 수 있음을 알 수 있다.

### 5.2 등가강성만 감소시켰을 때

다른 파라미터는 고정시킨 상태에서 각차 모우드의

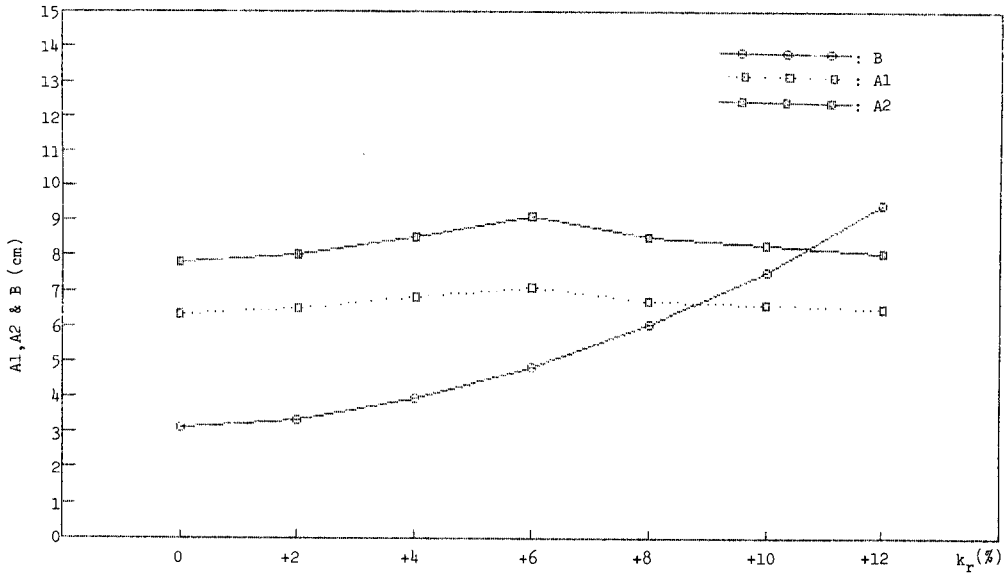


Fig. 8 The change of A1, A2 and B due to increasing equivalent stiffness

Table 3 The results of simulation due to decreasing equivalent stiffness

Change $k_r$	Natural frequency (Hz)		Sweet spot				
	2nd mode	3rd mode	B(Cm)	A1(Cm)	A2(Cm)	Sa(Cm <sup>2</sup> )	Sa/Ta(%)
0%	110	185	3.15	6.3	7.8	66.77	12.73
-2%	109	183	3.35	6.3	7.8	74.20	13.54
-4%	108	181	4.25	6.4	7.9	95.47	17.42
-6%	107	179	6.25	6.5	8.1	143.34	26.16
-8%	106	178	12.00	6.6	8.2	278.97	50.91
-10%	104	176	6.15	6.7	8.4	145.87	26.62
-12%	103	174	3.65	6.5	8.1	83.71	15.28
-14%	102	172	2.85	6.4	7.9	64.02	11.68

Sa ; Area of sweet spot(Cm<sup>2</sup>)

Ta ; Total area of gut(Cm<sup>2</sup>)

등가강성만을 기준치의 2%씩 감소시켜서 시뮬레이션 한 결과를 Table 3에 나타내었다.

그 내용을 살펴보면 2차 및 3차 모우드의 고유진동수가 등가강성이 감소함에 따라 점점 저주파쪽으로 이동하였고, 안정타점영역은 Fig. 9에서 보는 것처럼 점차 증가하다가 등가강성을 8% 감소시켰을 때 최대값을 보이고, 그 이후에는 점차 감소하는 추세를 보였다. 세부적으로 A1, A2 & B의 값의 변화를 살펴보면, Fig. 10에서 보는 것처럼 등가강성이 감소함에 따라 점점 증가하다가 B는 8% 감소시켰을 때, A1과 A2는 10% 감소시켰을 때 최대치를 보이고 다시 감소하는 경향을 나타내었다.

### 5.3 등가강성은 감소시키고 등가감쇠는 증가시켰을 때

테니스 라켓의 안정타점영역을 넓히기 위해서는 강성을 높이는 방법도 생각해 볼 수 있으나, 라켓의 재료의 특수성과 일반적으로 강성을 높이면 감쇠가 적어져서(예를들면 steel racket) 라켓의 진동이 손에 그대로 전달되어 테니스엘보우등 나쁜 영향을 끼치기 쉬우므로, 본 연구에서는 강성을 줄이고 감쇠를 키우는 쪽에 관심을 두고 시뮬레이션을 행하였다. 등가강성은 기준치의 2%씩 감소시키는 반면, 등가감쇠[식(16)에 있어서의  $c_r$ ]는 기준치의 2%씩 증가시켜서 시뮬레이션을 실시한 결과를 Table 4에 나타내었다.

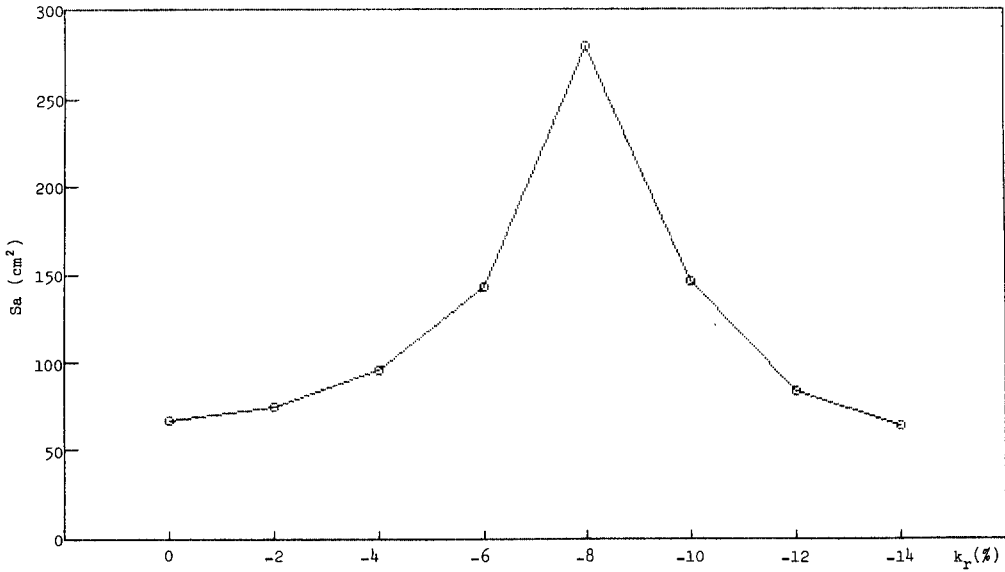


Fig. 9 The change of sweet spot due to decreasing equivalent stiffness

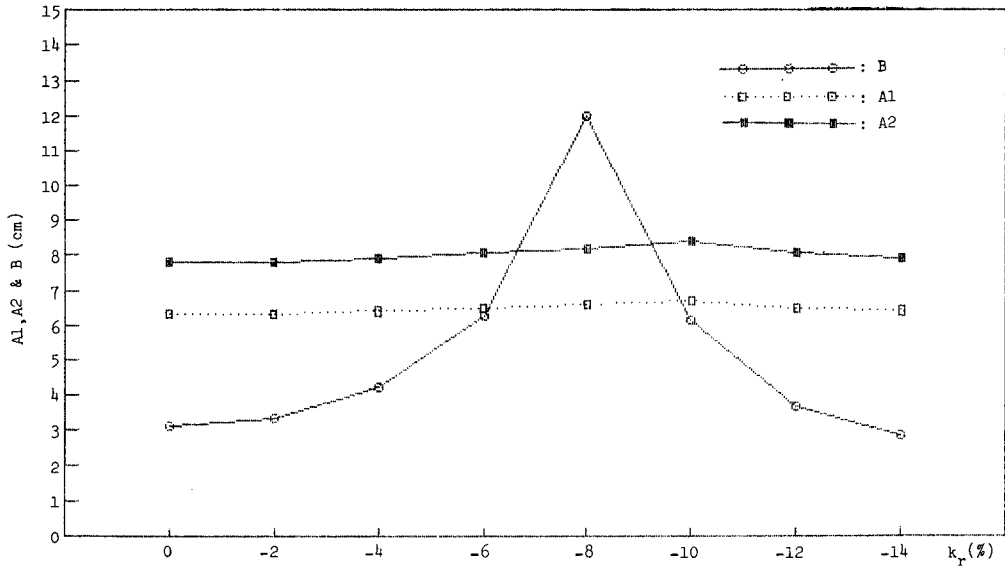


Fig. 10 The change of A1, A2 and B due to decreasing equivalent stiffness

고유진동수의 변화를 보면, 증가강성의 영향으로 2차, 3차 모드드의 고유진동수가 점점 저주파쪽으로 이동되는 것을 알 수 있었고, 안정타점영역의 변화는 Fig. 11의 그래프에서 보는 것처럼 점점 증가하다가 증가강성은 8% 감소시키고 증가감쇠는 8% 증가시켰을 때 최대값을 보이고 그 이후에는 점차 감소하는 추세를 보였다. 세부적으로 안정타점영역을 표현하는 요소 A1, A2 & B의 값을 살펴보자. Fig. 12의 그래프에서 보는 것과 같이 B는 증가강성의 8% 감소 및 등

가감쇠의 8% 증가시, A1과 A2는 증가강성의 8% 감소 및 증가감쇠의 8% 증가시 최대치를 보이고 점차 감소하는 성향을 보였다.

Fig. 13에 모드파라미터의 변경전(원래의 계)과 변경후(증가강성은 8% 감소시키고 증가감쇠는 8% 증가시켰을 때)의 전달함수와 진동 모드형태의 변화에 따른 안정타점영역의 비교를 도시하였다. 증가강성의 감소로 인하여 각차 모드가 저주파쪽으로 이동하였고 증가감쇠의 증가로 인하여 공진피크가 둔화되었으

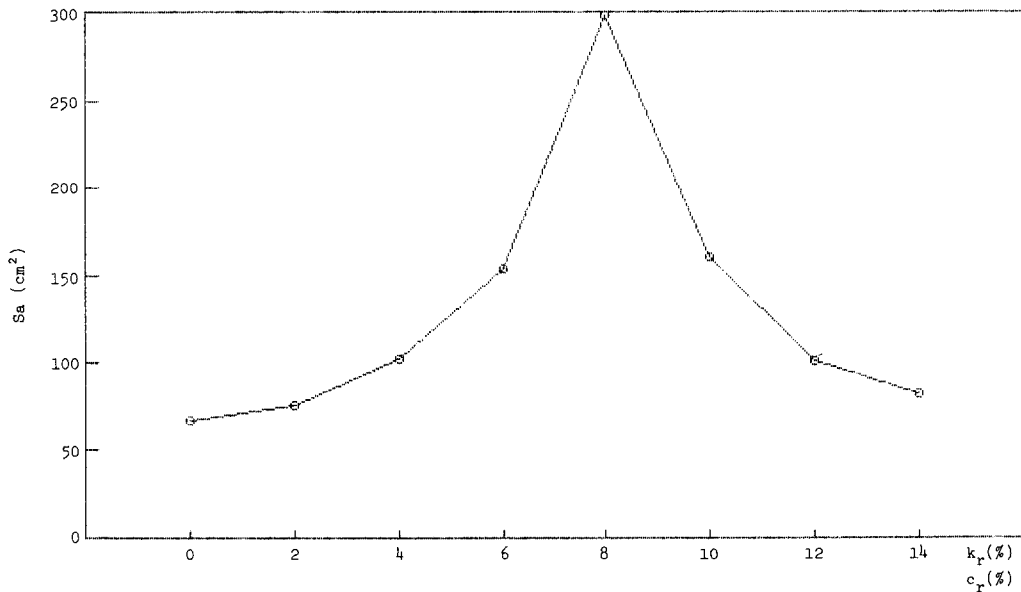


**Table 4** The results of simulation due to decreasing equivalent stiffness and increasing equivalent damping

Change		Natural frequency (Hz)		Sweet spot				
$k_r$	$c_r$	2nd mode	3rd mode	$B$ (Cm)	$A1$ (Cm)	$A2$ (Cm)	$Sa$ (Cm <sup>2</sup> )	$Sa/Ta$ (%)
0%	0%	110	185	3.15	6.3	7.8	66.77	12.73
-2%	+2%	109	183	3.35	6.4	8.0	75.83	13.83
-4%	+4%	108	181	4.35	6.6	8.3	101.81	18.58
-6%	+6%	107	179	6.35	6.8	8.6	153.61	28.03
-8%	+8%	106	178	11.95	7.0	8.9	298.46	54.46
-10%	+10%	104	176	6.25	7.2	9.2	161.00	29.38
-12%	+12%	103	174	3.95	7.1	9.1	100.52	18.34
-14%	+14%	102	172	3.25	7.1	9.1	82.70	15.10

$Sa$  ; Area of sweet spot(Cm<sup>2</sup>)

$Ta$  ; Total area of gut(Cm<sup>2</sup>)



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

며 전체적인 레벨이 낮아지고 있는 것을 볼 수 있다.

여기에서 특기할 사항은  $A1$ ,  $A2$ 의 변화율에 비하여  $B$ 의 변화율이 훨씬 크기 때문에 전체적인 안정타점영역의 변화율도  $B$ 의 변화율에 크게 의존하고 있다는 점이다. 그리고 제 5장 2절의 경우와 비교해 볼 때 등가감쇠의 증가로 인해 대체로 안정타점영역은 제 5장 2절의 경우보다 증가하였지만 그 경향은 비슷한 것으로 나타났다. 따라서 안정타점영역의 변화에 가장 큰 영향을 미치는 요소는 등가강성임을 재확인하였으며<sup>(6)</sup>, 주로 2차 모드(비틀림진동)의 크기에 따라 좌우됨을 알 수 있다.

## 6. 결 론

모우드파라미터의 변화에 따르는 안정타점영역에 대한 컴퓨터시뮬레이션을 행하여 얻어진 결과를 정리하면 다음과 같다.

(1) 테니스 라켓의 등가강성을 변화시킴으로서 진동 특성(특히, 비틀림진동)에 큰 변화를 가져왔다.

첫째, 등가강성을 증가시킨 경우에는 비틀림진동의 계속적인 감소에 따라 안정타점영역은 계속 증가하는 추세를 보였다.

둘째, 등가강성을 감소시킨 경우에는 안정타점영역

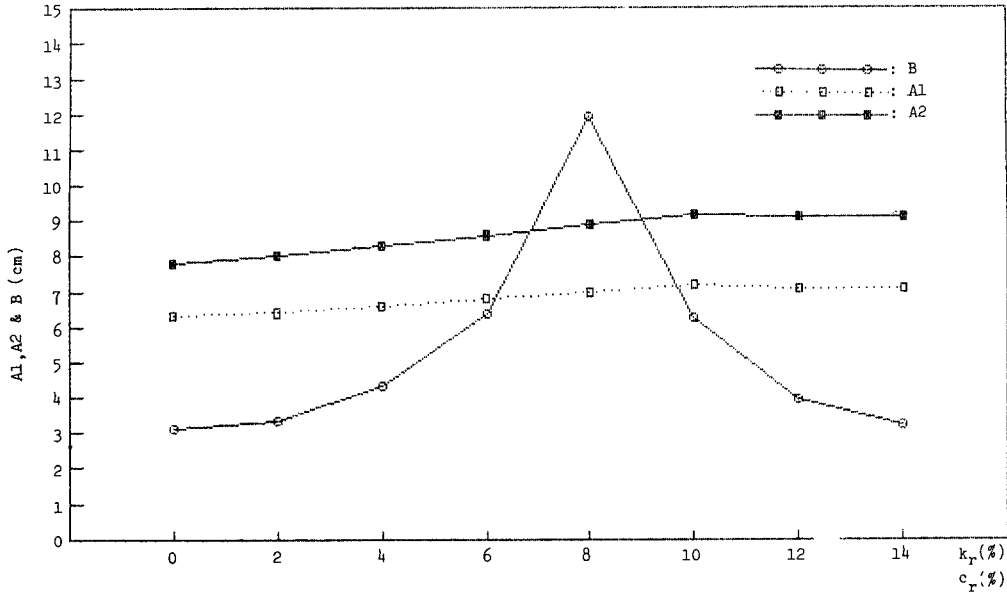
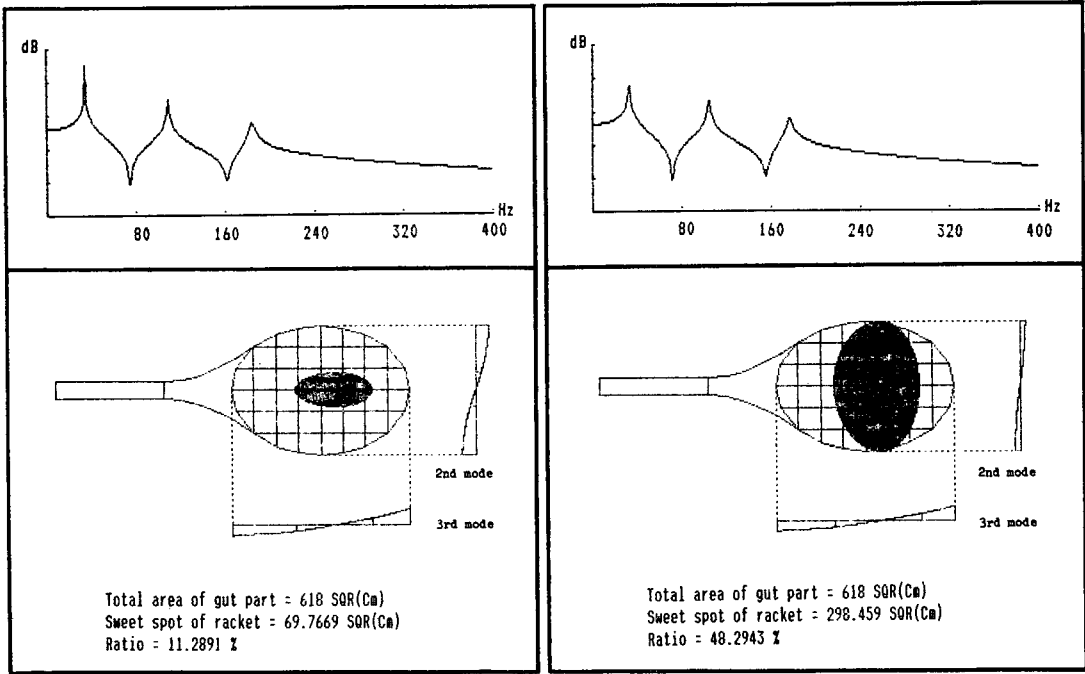


Fig. 12 The change of A1, A2 and B due to decreasing equivalent stiffness and increasing equivalent damping



(a) Before modification

(b) After modification

Fig. 13 Comparison of the transfer function and the sweet spot before and after the modification of the modal parameters

은 계속 증가하다가 모델 레퍼런스 선정한 라켓의 등가강성을 약 8% 정도 감소시켰을 때 최대치를 보이고 점차 감소하는 경향을 보였다.

(2) 등가강성은 감소시키면서 등가감쇠는 증가시켰을 경우에는, 등가강쇠의 증가에 따른 영향으로 안정 타점영역은 대체로 증가하였지만 등가강성의 영향을

크게 받아 증가강성만 감소시킨 경우와 비슷한 추세였고 증가강성을 기준치(원래의 계)의 약 8% 정도 감소시키고, 증가감쇠를 기준치의 약 8% 정도 증가시켰을 때 최대치를 보이고 점차 감소하는 경향을 보였다.

(3) 모우드파라미터의 변화에 따르는 안정타점영역의 변화를 컴퓨터그래픽을 통해서 가시적으로 표현함으로써 테니스라켓의 CAD 를 위한 자료를 제공하였다.

### 참 고 문 헌

- (1) Herbert Hatze, 1976, "Forces and Duration of Impact, and Grip Tightness During the Tennis Stroke", *Medicine and Science in Sports*, Vol. 8, pp. 88~95.
- (2) Toshihiko Watanabe, Yasuo Ikegami and Mitsumasa Miyashita, 1979, "Tennis the Effects of Grip Firmness on Ball Velocity after Impact", *MEDICINE AND SCIENCE IN SPORTS*, Vol. 11, No. 4, pp. 359~360.
- (3) Jae Eung Oh and Sung Ha Yum, 1985, "A Study to Identify the Dynamic Characteristics of the Tennis Racket by Modal Analysis", *Trans. of JSME*, (in Japanese), Vol. 51, No. 471, pp. 2966~2973.
- (4) Jae Eung Oh, Yun Taek Lim and Sung Ha Yum, 1985, "An Estimation of Power Contribution on Tennis Racket by Multi-Dimnsional Spectral Analysis", *Trans. of JSME*, (inJapanese), Vol. 51, No. 471, pp. 2974~2979.
- (5) Jae Eung Oh, You Yub Lee and Sung Ha Yum, 1986, "A Study on the Identifiation of Dynamic Characteristics of Tennis Racket by Acoustic Intensity Method", *Trans. of KSME*, Vol. 10, No. 5, pp. 601~610.
- (6) Jae Eung Oh, Ho Park, Yu Yub Lee and Sung Ha Yum, 1987, "The Estimation of Modal Parameters Due to the Change of Sweet Spot by the Structural Modification of a Tennis Racket", *JSME International Journal*, Vol. 30, No. 265, pp. 1121~1128.
- (7) T.R. Kane, W.C. Hayes and J.D. Priest, 1974, "Experimental Determination of Force Exerted in Tennis Play", *Biomechanics IV*, pp. 284~290.