

# 인체 진동모델의 진동 전달특성에 관한 조사

°우 춘규,\* 정 완섭,\*\* 김 수현,\* kwak 윤근\*

## Survey on the vibration transfer characteristics of the human body vibration models.

Chun-Kyu Woo,\* Wan-Sup Cheung,\*\* Soo-Hyun Kim,\* Yoon-Keun Kwak\*

### ABSTRACT

This paper addresses a systematic way of understanding the transfer characteristics of whole-body vibration due to the external excitation. Amirouche's and Tamaoki's models are considered, whose analysis shows a new result that resonant frequencies related to the head vibration are well coincided with those of the body. This point reveals that the improvement of the ride quality of passenger cars can be achieved by isolating only external vibration components transferred to the body. Finally, this paper points out the limitation of previous whole-body vibration models, which gives the motivations of setting up more 'practical and generalized' whole-body vibration models of interest in this study.

**Key Words** : whole-body vibration models(인체 진동 모델), ride quality (승차감)

### 1. 서 론

인체의 진동 응답특성을 모델링하기 위하여 인체를 선형계 즉, 질량, 스프링, 그리고 댐퍼로 근사화하는 방법이 널리 이용되고 있다<sup>(1)</sup>. Fairley와 Griffin<sup>(2)</sup>은 인체를 3개의 부분으로, Donnati와 Bonthoux<sup>(3)</sup>는 인체를 2개의 부분으로, ISO 7962<sup>(4)</sup>에서는 인체를 4개의 부분으로 나누어 해석하였다. 이들은 30Hz이하의 관심 주파수내에서 등가 진동계를 시불변 선형 시스템으로 간주하고 있으며<sup>(5)</sup>, z축 방향의 진동 성분만을 고려하였다.

Amirouche<sup>(6)</sup>는 그림 1과 같이 z축 방향의 보다 일반적인 모델 즉, 5개의 부분으로 구성된 등가 진동계를 제시하였다. 이와는 달리 Griffin<sup>(7)</sup>은 인체 각 부분은 z축 방향으로만 진동하기 보다는 3방향 병진운동 및 회전운동이 서로 복합적으로 연결되어 영향을 미친다는 실험적 데이터를 제시하였다. Tamaoki<sup>(8)</sup>는 이러한 사실에 바탕을 둔 그림 2와 같은 등가 진동모델을 제시하였으며, 몸통 부분의 3개의 병진운동과 머리 부분의 1개의 병진운동, 2개의 회전운동을 고려하였다.

본 연구에서는 z축 방향의 일반적 모델인 Amirouche의 등가 진동계와 병진운동과 회전운동을 함께 고려한 Tamaoki의 등가 진동모델을 이용하여 인체 피폭 진동의 새로운 전달특성을 분석한다. 이러한 분석은 인체 진동 전달특성의 새로운 이해를 제공할 뿐 아니라, 승차감 향상을 위한 방향을 제공하게 된다.

### 2. 운동방정식

그림 1의 Amirouche 등가 진동계의 운동방정식은 아래와 같으며 등가 진동계에 사용된 매개변수들은 표 1과 같다.

$$\begin{aligned} m_1 \ddot{z}_1 + c_1 (\dot{z}_1 - \dot{z}_2) + k_1 (z_1 - z_2) &= 0 \\ m_2 \ddot{z}_2 + c_1 (\dot{z}_2 - \dot{z}_1) + c_2 (\dot{z}_2 - \dot{z}_3) + k_1 (z_2 - z_1) + k_2 (z_2 - z_3) &= 0 \\ m_3 \ddot{z}_3 + c_2 (\dot{z}_3 - \dot{z}_2) + c_3 (\dot{z}_3 - \dot{z}_4) + k_2 (z_3 - z_2) + k_3 (z_3 - z_4) &= 0 \\ m_4 \ddot{z}_4 + c_3 (\dot{z}_4 - \dot{z}_3) + c_4 (\dot{z}_4 - \dot{z}_5) + c_5 (\dot{z}_4 - \dot{z}_0) + k_3 (z_4 - z_3) + k_4 (z_4 - z_5) + k_5 (z_4 - z_0) &= 0 \\ m_5 \ddot{z}_5 + c_4 (\dot{z}_5 - \dot{z}_4) + k_4 (z_5 - z_4) &= 0 \end{aligned}$$

Table 1 Specification of the estimated parameters.

Symbol	Value	Symbol	Value	Symbol	Value
m1	5.70Kg	k1	12000N/m	c1	1500Ns/m
m2	17.36Kg	k2	105000N/m	c2	1600Ns/m
m3	2.69Kg	k3	105000N/m	c3	1800Ns/m
m4	11.76Kg	k4	50000N/m	c4	1100Ns/m
m5	14.10Kg	k5	10000N/m	c5	100Ns/m

그림 2의 Tamaoki 등가 진동모델은 아래와 같은 구속 조건을 갖는다.

$$\begin{aligned} x_c &= x_b, \quad y_c = y_b \\ x_h &= x_c - l_g \theta_y = x_b - l_g \theta_y \\ y_h &= y_c - l_g \theta_x = y_b - l_g \theta_x \\ z_h &= z_c \end{aligned}$$

\* 한국과학기술원 기계공학과

\*\* 한국표준과학연구원

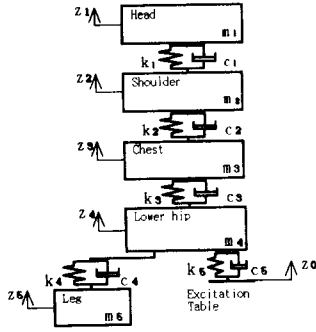


Fig. 1 Amirouche's human body vibration model configuration.

즉, 머리 부분의 회전중심에서의 일반화된 좌표  $x, y$ 가 몸통 부분의 질량중심에서의 일반화된 좌표  $x, y$ 와 같다. 이러한 구속조건을 만족하는 Tamaoki 등가 진동모델의 운동방정식은 아래와 같다.

$$(I_y + ml_g^2)\ddot{\theta}_y - c_1\alpha(\dot{z}_h - \dot{z}_b - \alpha\dot{\theta}_y) + c_2\alpha(\dot{z}_h - \dot{z}_b + \alpha\dot{\theta}_y) - k_1\alpha(z_h - z_b - \alpha\theta_y) + k_2\alpha(z_h - z_b + \alpha\theta_y) = ml_g\ddot{x}_b$$

$$(I_x + ml_g^2)\ddot{\theta}_x + 2c_3\alpha^2\dot{\theta}_x + 2k_3\alpha^2\theta_x = ml_g\ddot{y}_b$$

$$m\ddot{z}_h + c_1(\dot{z}_h - \dot{z}_b - \alpha\dot{\theta}_y) + c_2(\dot{z}_h - \dot{z}_b + \alpha\dot{\theta}_y) + c_3(\dot{z}_h - \dot{z}_b - \alpha\dot{\theta}_x) + c_3(\dot{z}_h - \dot{z}_b + \alpha\dot{\theta}_x) + k_1(z_h - z_b - \alpha\theta_y) + k_2(z_h - z_b + \alpha\theta_y) + k_3(z_h - z_b - \alpha\theta_x) + k_3(z_h - z_b + \alpha\theta_x) = 0$$

$$(M + m)\ddot{x}_b + c_x(\dot{x}_b - \dot{u}_x) + k_x(x_b - u_x) = ml_g\ddot{\theta}_y$$

$$M\ddot{z}_b + c_2(\dot{z}_b - \dot{u}_z) + c_1(\dot{z}_b - \dot{z}_h + \alpha\dot{\theta}_y) + c_2(\dot{z}_b - \dot{z}_h - \alpha\dot{\theta}_y) + c_3(\dot{z}_h - \dot{z}_b - \alpha\dot{\theta}_x) + c_3(\dot{z}_h - \dot{z}_b + \alpha\dot{\theta}_x) + k_2(z_b - u_z) + k_1(z_b - z_h + \alpha\theta_y) + k_2(z_b - z_h - \alpha\theta_y) + k_3(z_b - z_h + \alpha\theta_x) + k_3(z_b - z_h - \alpha\theta_x) = 0$$

$$(M + m)\ddot{y}_b + c_y(\dot{y}_b - \dot{u}_y) + k_y(y_b - u_y) = ml_g\ddot{\theta}_x$$

위의 Tamaoki 등가 진동모델의 매개변수들은 표 2에 나타나 있다.

Table 2 Specification of the estimated parameters.

Symbol	Value	Symbol	Value
$k_1$	80000 N/m	$c_z$	1450 Ns/m
$k_2$	10800 N/m	$m$	5 Kg
$k_3$	8500 N/m	$M$	50 Kg
$k_x$	5000 N/m	$l_x$	8.0 m
$k_y$	3900 N/m	$l_y$	7.0 m
$k_z$	88000 N/m	$l_z$	11.0 m
$c_1$	10 Ns/m	$l_g$	6.0 m
$c_2$	290 Ns/m	$l_m$	5.5 m
$c_3$	80 Ns/m	$\alpha$	4.0 m
$c_x$	440 Ns/m	$b$	4.0 m
$c_y$	180 Ns/m	$\rho$	1000 Kg/m <sup>3</sup>

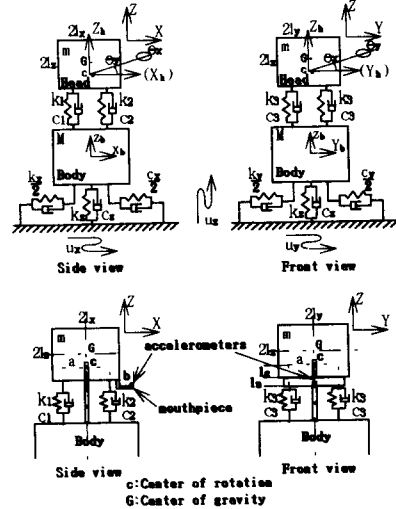


Fig. 2 Tamaoki's human body vibration model configuration.

### 3. 인체 진동 전달 특성의 분석 및 토의

그림 3은 Amirouche 등가 진동계(그림 1)의 엉덩이와 가슴, 가슴과 어깨, 어깨와 머리, 엉덩이와 머리사이의 진동 전달특성들을 보이고 있다. 이러한 인체 각 부분의 공진주파수와 진동 이득율의 특성을 도표화 하면 표 3과 같다.

Table 3 Comparison of the resonance frequencies(Hz) of Amirouche's model.

Input --	Lower hip -- Chest		Chest -- Shoulder		Shoulder -- Head		Lower hip -- Head	
	$f_n$ (Hz)	gain	$f_n$ (Hz)	gain	$f_n$ (Hz)	gain	$f_n$ (Hz)	gain
Head	7	1.3	9	1.5	16	1.2	7	1.8

엉덩이와 가슴사이의 진동 전달특성(그림 3-a)는 엉덩이와 머리사이의 진동 전달특성(그림 3-d)와 공진주파수가 표 3에 보인 바와 같이 일치함을 볼 수 있다. 가슴과 어깨사이의 진동 특성(그림 3-b)와, 어깨와 머리사이의 진동 특성(그림 3-c) 각각의 공진주파수(9Hz, 16Hz)는 엉덩이와 가슴사이의 공진주파수(7Hz)와 일치하지 않으며 이들이 엉덩이와 머리사이의 진동 전달특성에 미치는 영향은 미미하고 볼 수 있다. 따라서 머리 부분의 진동 특성은 주로 엉덩이와 가슴사이의 진동 특성에 기인한다고 생각된다.

Tamaoki 등가 진동모델(그림 2)의 가진 테이블과 몸통사이의 진동 전달특성은 그림 4에, 몸통과 머리사이의 진동 전달특성은 그림 5에, 가진 테이블과 머리사이의 진동 전달특성은 그림 6에 각각 보이고 있다. 이들 각각의 그림은 x축, y축, 그리고 z축의 독립된 가진에 의한 진동 전달특성으로 세분화된다. 이렇게 세분화된 그림 4, 5, 6의 공진주파수와 진동 이득율은 표 4와 같다.

**Table 4** Comparison of the resonance frequencies(Hz) of Tamaoki's model. (-- : uncoupled term)

Input -- Output	Excitation table -- Torso		Torso -- Head		Excitation table -- Head	
	$f_n$ (Hz)	gain	$f_n$ (Hz)	gain	$f_n$ (Hz)	gain
x---x	1.5	2.7	4	1.6	1.5	1.7
x---y	--	--	--	--	--	--
x---z	--	--	4.5	0.1	4.5	0.1
x--- $\theta_x$	--	--	--	--	--	--
x--- $\theta_y$	--	--	4.5	20	4.5	0.1
y---x	--	--	--	--	--	--
y---y	1.5	2.7	4	2.2	1.5	3
y---z	--	--	--	--	--	--
y--- $\theta_x$	--	--	4	30	1.5,4	2.4,5,6
y--- $\theta_y$	--	--	--	--	--	--
z---x	--	--	4.5	0.2	4.5	0.3
z---y	--	--	--	--	--	--
z---z	6	1.8	12	1.5	6	2.3
z--- $\theta_x$	--	--	--	--	--	--
z--- $\theta_y$	--	--	4.5,12	3.2,2.9	4.5	5.2

특히, Tamaoki 등가 진동모델의 가진 방향 즉, x축, y축, 그리고 z축에 대한 진동 전달특성은 Amirouche 등가 진동계의 가진 및 운동 방향 즉, z축만의 진동 전달특성과는 달리, 인체 각 부분사이의 병진 및 회전운동의 진동 특성이 복합적으로 연결되어 있기 때문에, 이들 3가지의 독립된 가진 방향에 대한 특성은 다음과 같다.

**A. x축 방향만의 가진.**

가진 테이블과 머리 사이의 x축 방향 진동 특성(그림 6-a(1))은 가진 테이블과 몸통사이의 x축 방향 진동 특성(그림 4-a)의 영향에 기인하는 것으로 여겨지며, 몸통과 머리사이의 x축 방향 진동 특성(그림 5-a(1))의 영향은 미미함을 알 수 있다. 이것은 표 4의 1행에 보인 바와 같이 몸통과 머리사이의 공진주파수(4Hz)와 가진 테이블과 몸통사이의 공진주파수(1.5Hz)가 다르기 때문이다. 표 4의 3행에 보인 바와 같이 가진 테이블과 머리 사이의 z축 방향 진동 특성(그림 6-a(2))는 몸통과 머리사이의 z축 방향 진동 특성(그림 5-a(2))의 영향에 기인하는 것으로 여겨진다. 표 4의 2행에 나타난 바와 같이 x축 가진 방향과 인체 각 부분의 y축 방향 진동은 서로 비연성되어 있다.

**B. y축 방향만의 가진.**

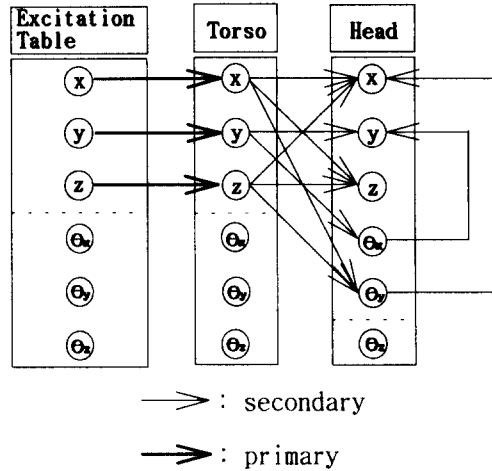
가진 테이블과 머리 사이의 y축 방향 진동 특성(그림 6-b(1))은 가진 테이블과 몸통사이의 y축 방향 진동 특성(그림 4-b)의 영향에 기인하는 것으로 여겨지며, 몸통과 머리사이의 y축 방향 진동 특성(그림 5-b(1))의 영향은 미미함을 알 수 있다. 이것은 표 4의 7행에 주어진 바와 같이 몸통과 머리사이의 공진주파수(4Hz)와 가진 테이블과 몸통사이의 공진주파수

(1.5Hz)가 일치하지 않기 때문이다. 표 4의 6행과 8행에 보인 바와 같이 y축 가진 방향과 인체 각 부분의 x축 및 z축 방향 진동은 서로 비연성되어 있다.

**C. z축 방향만의 가진.**

표 4의 11행에 보인 바와 같이 가진 테이블과 머리 사이의 x축 방향 진동 특성(그림 6-c(1))은 몸통과 머리 사이의 x축 방향 진동 특성(그림 5-c(1))의 영향에 기인하는 것으로 여겨진다. 가진 테이블과 머리 사이의 z축 방향 진동 특성(그림 6-c(2))는 가진 테이블과 몸통사이의 z축 방향 진동 특성(그림 4-c)의 영향에 기인하는 것으로 여겨지며, 몸통과 머리사이의 z축 방향 진동 특성(그림 5-c(2))의 영향은 미미함을 알 수 있다. 이것은 표 4의 13행에 주어진 바와 같이 몸통과 머리사이의 공진주파수(12Hz)와 가진 테이블과 몸통사이의 공진주파수(6Hz)가 일치하지 않기 때문이다. 표 4의 12행에 보인 바와 같이 z축 가진 방향과 인체 각 부분의 y축 방향 진동은 서로 비연성되어 있다.

위의 분석내용을 간략히 도식화 하면 그림 7과 같은 진동전달지도로 나타낼 수 있다.



**Fig.7** Vibration transfer map of Tamaoki's model.

그림 7의 진동전달지도에 의하면, 머리 부분의 x축 방향 진동 특성은 몸통 부분의 x축 방향 진동 특성, z축 방향 진동 특성 및 머리 부분의 pitching 진동 특성에 기인한다. 그리고 머리 부분의 y축 방향 진동 특성은 몸통 부분의 y축 방향 진동 특성 및 머리 부분의 rolling 진동 특성에 기인한다. 또한 머리 부분의 z축 방향 진동 특성은 몸통 부분의 x축 방향 진동 특성 및 z축 방향 진동 특성에 기인한다. 위의 머리 부분에서의 rolling 및 pitching 진동은 머리 부분에서의 질량중심과 회전중심사이의 편심에 의해 나타난다.

요약하면, Tamaoki 등가 진동모델의 머리 부분의 x축, y축, 그리고 z축 각각의 공진주파수가 몸통 부분의 x축, y축, 그리고 z축 각각의 공진주파수와 일치함을

보이므로, Amirouche 등가 진동계의 진동 전달특성과 같이, 머리 부분의 진동 특성이 몸통 부분의 진동 특성의 영향에 기인한다고 생각된다.

하지만, Tamaoki 등가 진동모델은 몸통 부분의 병진운동만 고려했을뿐, 회전운동을 전혀 고려하지 않았기 때문에, 머리 부분의 rolling 및 pitching 진동 특성에 대한 이해를 할 수 없는 한계를 갖는다.

#### 4. 결 론

본 연구에서 고려한 Amirouche와 Tamaoki 등가 진동모델들의 진동 응답특성 분석으로 부터, 머리 부분의 진동은 주로 몸통 부분의 진동 특성에 좌우됨을 새로이 확인할 수 있었다. 이러한 사실로 부터 주행중인 자동차의 승차감 개선은 일차적으로 몸통 부분에 전달되는 진동경로의 효율적 차단으로 이루어질 수 있다는 점 또한 이해할 수 있었다. 기존의 Amirouche와 Tamaoki의 등가 진동모델은 몸통부의 병진운동 성분만을 고려하였으나, 현재 진행중인 도로주행 기초실험에서 실제 몸통부의 진동은 병진 및 회전운동 성분이 복합적으로 연결되어 있다는 점을 확인하였다. 따라서 기존모델의 확장을 통한 새로운 승차감 평가 방안을 현재 연구 중이다.

#### 참 고 문 헌

(1) R. R. Coermann, 1961, "The mechanical impedance of the human body in sitting and standing position at

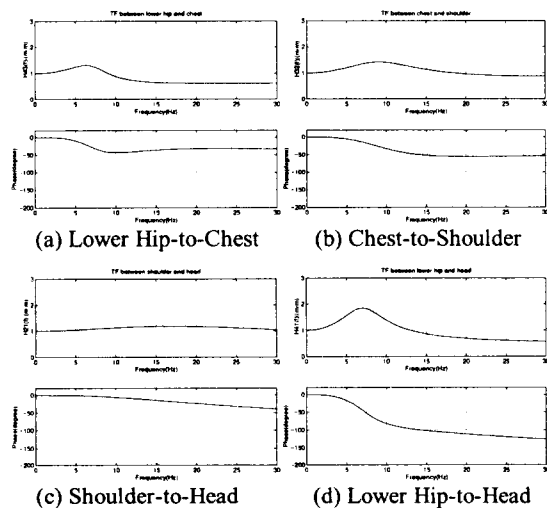


Fig.3 Vibration transfer characteristics of Amirouche's model.

low frequencies." *Wright-Patterson Air Force Base, ASD-TR 61-492.*

- (2) Thomas E. Fairley and Michael J. Griffin, 1989, "The apparent mass of the seated human body: vertical vibration." *Journal of Biomechanics* Vol.22, NO.2, pp.81-94.
- (3) P. M. Donati and C. Bonthoux, 1983, "Biodynamic response of the human body in the sitting position when subjected to vertical vibration." *Journal of Sound and Vibration* Vol.90, No.3, pp.423-442.
- (4) *International Organization for Standardization* 1987, ISO 7962. "Mechanical vibration and shock-mechanical transmissibility of the human body in the z direction."
- (5) *International Organization for Standardization* 1987, ISO 5982. "Vibration and shock-mechanical driving point impedance of the human body."
- (6) F. M. L. Amirouche and S. K. Ider, 1988, "Simulation and Analysis of a biodynamic human model subjected to low accelerations-- a correlation study." *Journal of Sound and Vibration* Vol.123, No.2, pp.281-292.
- (7) M. J. Griffin, 1990, *Handbook of Human Vibration*, Academic Press, London.
- (8) G. Tamaoki and T. Yoshimura, 1995, "A study on dynamics and modeling of human body exposed to multi-dimensional excitation." *Asia-Pacific Vibration Conference '95*, Kuala Lumpur, November 1995, pp.816-821.

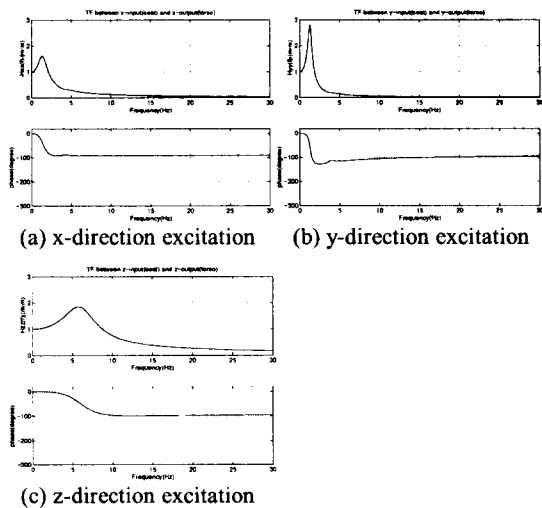
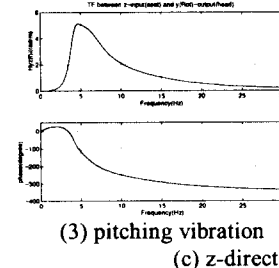
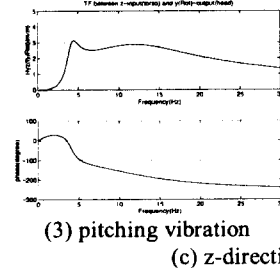
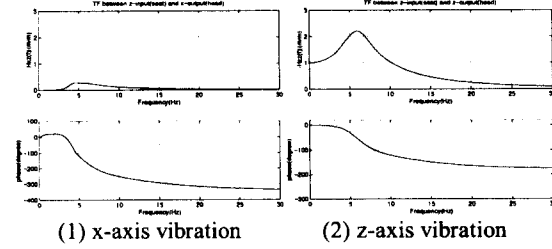
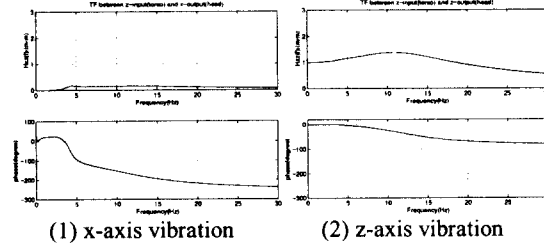
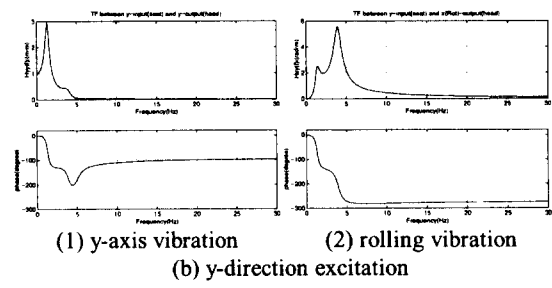
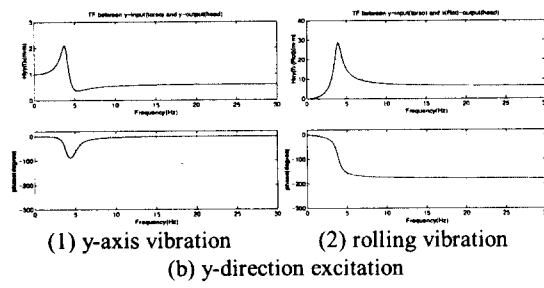
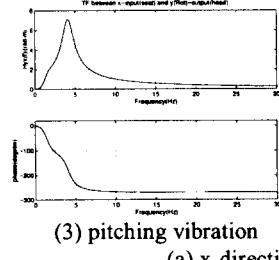
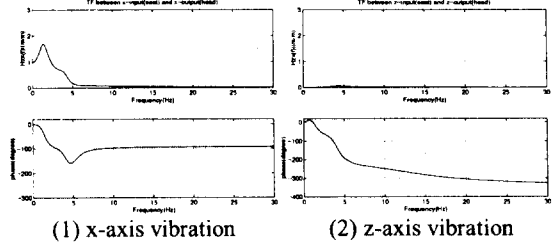
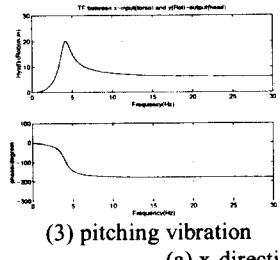
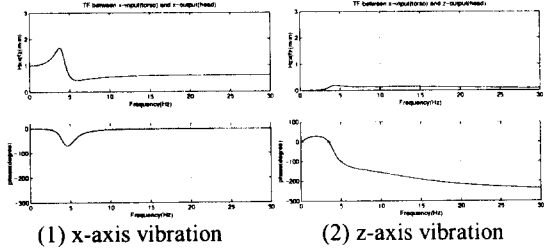


Fig.4 Vibration transfer characteristics of excitation table tatorso. (Tamaoki's model)



**Fig.5** Vibration transfer characteristics of torso to head. (Tamaoki's model)

**Fig.6** Vibration transfer characteristics of excitation table to head. (Tamaoki's model)