

# 인체 진동모델의 진동 전달특성에 관한 조사

Survey on the Vibration Transfer Characteristics of the Whole-Body Vibration Models

우춘규\* · 정완섭\*\* · 김수현\* · 곽윤근\*

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

(1996년 5월 10일 접수 ; 1996년 6월 18일 심사완료)

**Key Words :** Whole-Body Vibration Models(인체 진동 모델), Ride Quality(승차감)

## 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.

## 1. 서 론

인체의 진동 응답특성을 모델화하기 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, Donnati Bonthoux<sup>(3)</sup>는 인체를 2개의 부분으로, ISO 7962<sup>(4)</sup>에서는 인체를 4개의 부분으로 나누어 각각 해석하였다. 이들은 30 Hz 이하의 관심 주파수내에서 등가 진동계를 시불변 선형 시스템으로 간주하고 있으며<sup>(5)</sup>, z축 방향의 진동 성분만을 고려하였다.

Amirouche<sup>(6)</sup>는 Fig. 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 진동하기보다는 3방향 병진운동 및 회전운동이 서로 복합적으로 연결되어 영향을 미친다는 실험적 데이터를 제시하였다. Tamaoki<sup>(8)</sup>

는 이러한 사실에 바탕을 둔 Fig. 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 진동계를 이용하여 인체 피폭 진동의 새로운 전달특성을 분석한다. 이러한 분석은 인체 진동 전달특성의 새로운 이해를 제공할 뿐만 아니라, 승차감(ride quality) 향상을 위한 방향을 제공하게 된다.

## 2. 운동방정식

Fig. 1의 Amirouche 등가 진동계의 운동방정식은 아래와 같으며 등가 진동계에 사용된 매개변수(parameter)들은 Table 1과 같다.

$$\begin{aligned} m_1 \ddot{z}_1 + c_1 (\dot{z}_1 - \dot{z}_2) + k_1 (z_1 - z_2) &= 0 \\ m_2 \ddot{z}_2 + c_1 (\dot{z}_2 - \dot{z}_1) + c_2 (\dot{z}_2 - \dot{z}_3) \\ + k_1 (z_2 - z_1) + k_2 (z_2 - z_3) &= 0 \end{aligned}$$

\*한국과학기술원 기계공학과

\*\*정회원, 한국표준과학연구원, 음향/진동그룹

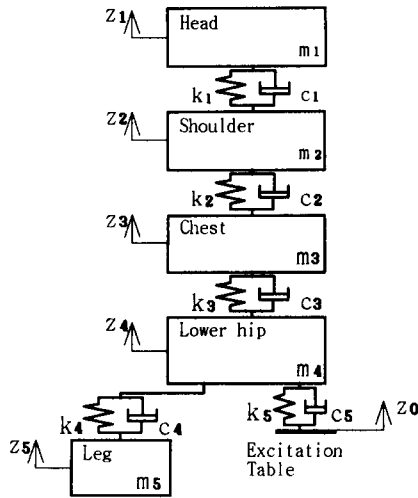


Fig. 1 Amriouche's whole-body vibration model configuration

Table 1 Specification of the estimated parameters

Symbol	Value	Symbol	Value	Symbol	Value
$m_1$	5.70 kg	$k_1$	120000 N/m	$c_1$	1500 Ns/m
$m_2$	17.36 kg	$k_2$	105000 N/m	$c_2$	1600 Ns/m
$m_3$	2.69 kg	$k_3$	105000 N/m	$c_3$	1800 Ns/m
$m_4$	11.76 kg	$k_4$	50000 N/m	$c_4$	1100 Ns/m
$m_5$	14.10 kg	$k_5$	10000 N/m	$c_5$	100 Ns/m

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

Fig. 2의 Tamaoki 등가 진동계는 아래와 같은 구속 조건을 갖는다.

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

즉, 머리 부분의 회전중심(center of rotation)에서의 일반화된 좌표(generalized coordinates)  $x, y$ 가 몸통 부분의 질량중심(center of mass)에서의 일반화된 좌표  $x, y$ 와 같다. 이러한 구속조건을 만족하는 Tamaoki 등가 진동모델의 운동방정식은 아래와 같다.

$$(I_y + ml_g^2) \ddot{\theta}_y - c_1 \alpha (\dot{z}_h - \dot{z}_b - \alpha \dot{\theta}_y)$$

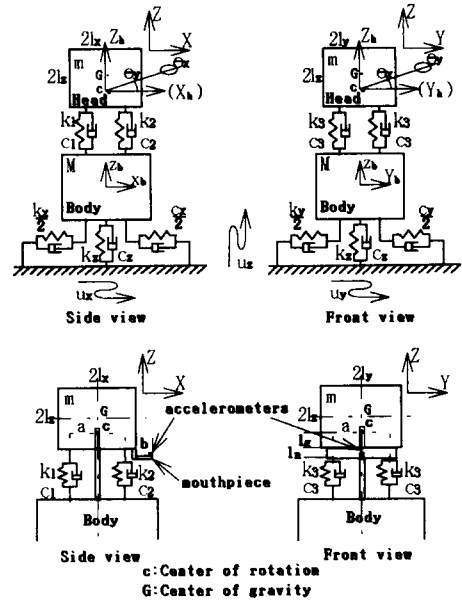


Fig. 2 Tamaoki's whole-body vibration model configuration

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	$I_x$	0.08 m
$k_y$	3900 N/m	$I_y$	0.07 m
$k_z$	88000 N/m	$I_a$	0.11 m
$c_1$	10 Ns/m	$I_g$	0.06 m
$c_2$	290 Ns/m	$I_m$	0.05 m
$c_3$	80 Ns/m	$a$	0.04 m
$c_x$	440 Ns/m	$b$	0.04 m
$c_y$	180 Ns/m	$\rho$	1000 kg/m <sup>3</sup>

$$\begin{aligned}
 & -c_2 \alpha (\dot{z}_h - \dot{z}_b - \alpha \dot{\theta}_y) - k_1 \alpha (z_h - z_b - \alpha \theta_y) \\
 & + k_2 \alpha (z_h - z_b - \alpha \theta_y) = ml_g \ddot{x}_b \\
 & (I_x + ml_g^2) \ddot{\theta}_x + 2c_3 \alpha^2 \dot{\theta}_x + 2k_3 \alpha^2 \theta_x = ml_g \ddot{y}_b \\
 & m \ddot{z}_h + c_1 (\dot{z}_h - \dot{z}_b - \alpha \dot{\theta}_y) + c_2 (\dot{z}_h - \dot{z}_b - \alpha \dot{\theta}_y) \\
 & + c_3 (\dot{z}_h - \dot{z}_b - \alpha \dot{\theta}_x) + c_3 (\dot{z}_h - \dot{z}_b + \alpha \dot{\theta}_x) \\
 & + k_1 (z_h - z_b - \alpha \theta_y) + k_2 (z_h - z_b - \alpha \theta_y) \\
 & + k_3 (z_h - z_b - \alpha \theta_x) + k_3 (z_h - z_b + \alpha \theta_x) = 0 \\
 & (M + m) \ddot{x}_b + c_x (\dot{x}_b - \dot{u}_x) + k_x (x_b - u_x) \\
 & = ml_g \ddot{\theta}_y \\
 & M \ddot{z}_b + c_2 (\dot{z}_b - \dot{u}_z) + c_1 (\dot{z}_b - \dot{z}_h + \alpha \dot{\theta}_y) \\
 & + c_2 (\dot{z}_b - \dot{z}_h - \alpha \dot{\theta}_y) + c_3 (\dot{z}_h - \dot{z}_b - \alpha \dot{\theta}_x) \\
 & + c_3 (\dot{z}_h - \dot{z}_b + \alpha \dot{\theta}_x) + k_2 (z_b - u_z) \\
 & + k_1 (z_b - z_h + \alpha \theta_y) + k_2 (z_b - z_h - \alpha \theta_y)
 \end{aligned}$$

$$+k_3(z_b - z_h + \alpha\theta_x) + k_3(z_b - z_h - \alpha\theta_x) = 0$$

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

위의 Tamaoki 등가 진동계의 매개변수들은 Table 2에 나타나 있다.

### 3. 인체 진동 전달 특성의 분석 및 토의

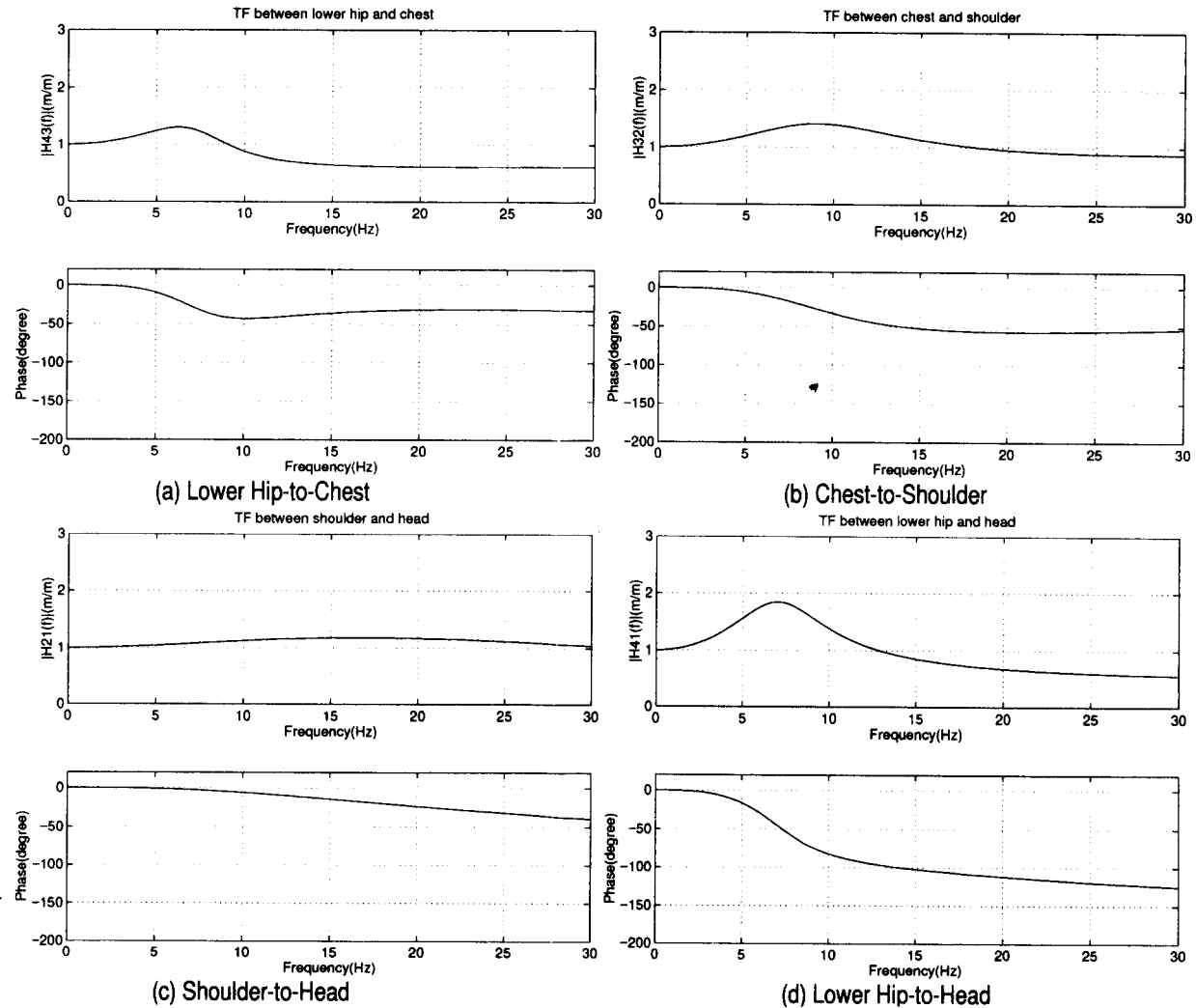
Fig. 3은 Amirouche 등가 진동계(Fig. 1)의 엉덩이와 가슴, 가슴과 어깨, 어깨와 머리, 엉덩이와 머리 사이의 진동 전달특성들을 보이고 있다. 이러한 인체 각 부분의 공진주파수(resonance frequency)와 진동 이득율(gain)의 특성을 도표화하면 Table 3과 같다.

엉덩이와 가슴 사이의 진동 전달특성(Fig. 3(a))는

**Table 3** Comparison of the resonant frequencies(Hz) of Amirouche's model

Input output	Lower hip chest		Chest shoulder		Shoulder head		Lower hip head	
	$f_0$ (Hz)	gain	$f_0$ (Hz)	gain	$f_0$ (Hz)	gain	$f_0$ (Hz)	gain
Head	7	1.3	9	1.5	16	1.2	7	1.8

엉덩이와 머리 사이의 진동 전달특성(Fig. 3(d))와 공진주파수가 Table 3에 보인 바와 같이 일치함을 볼 수 있다. 가슴과 어깨 사이의 진동 특성(Fig. 3(b))와, 어깨와 머리 사이의 진동 특성(Fig. 3(c)) 각각의 공진주파수(9 Hz, 16 Hz)는 엉덩이와 가슴 사이의 공진주파수(7 Hz)와 일치하지 않으며 이들이 엉덩이와 머리 사이의 진동 전달특성에 미치는 영향



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

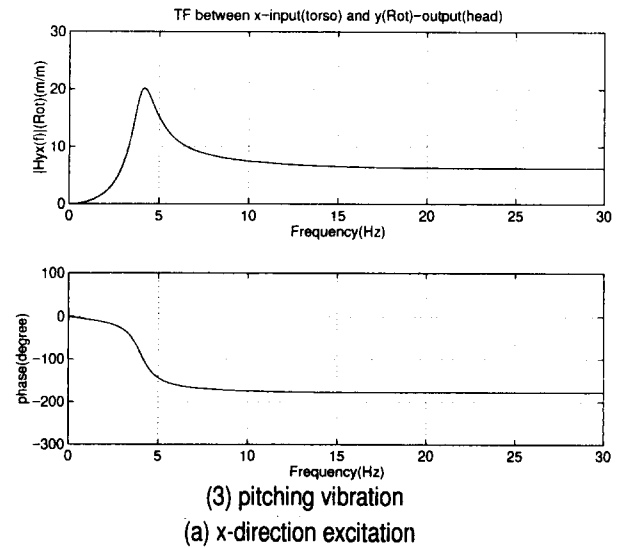
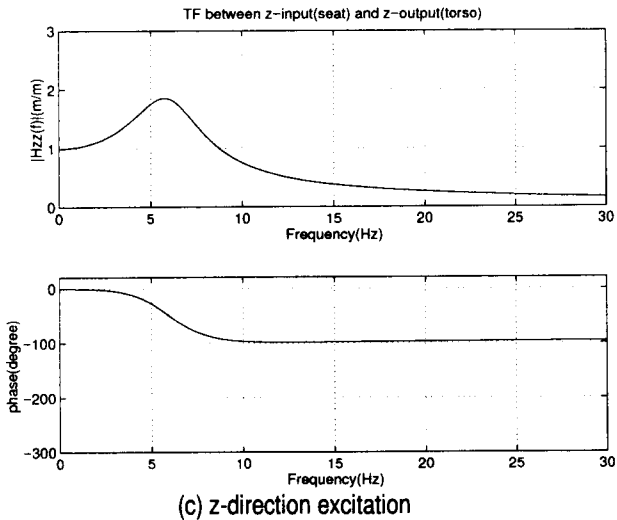
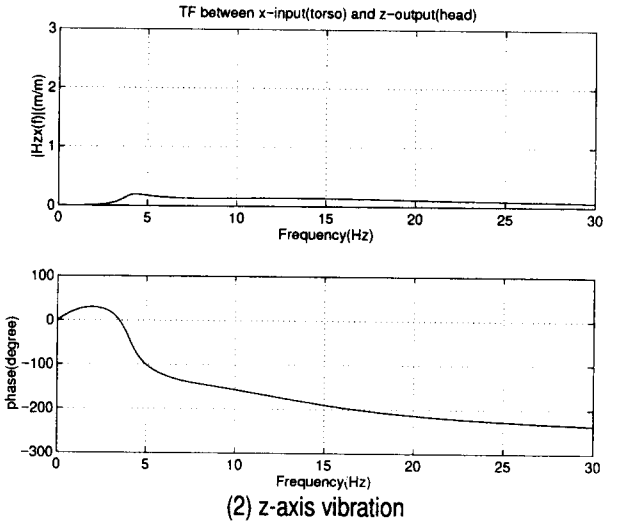
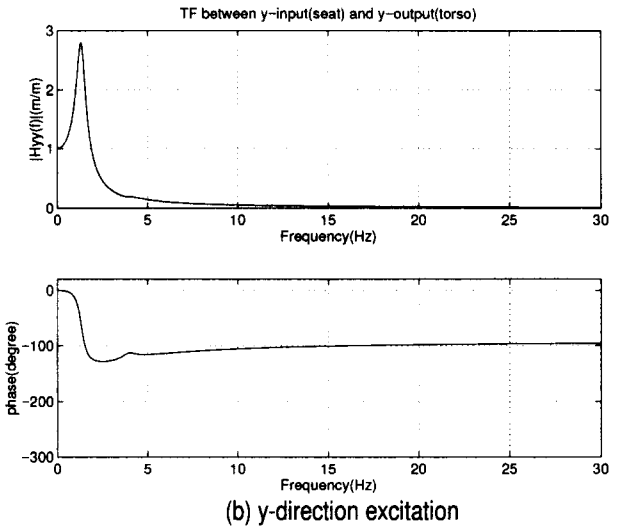
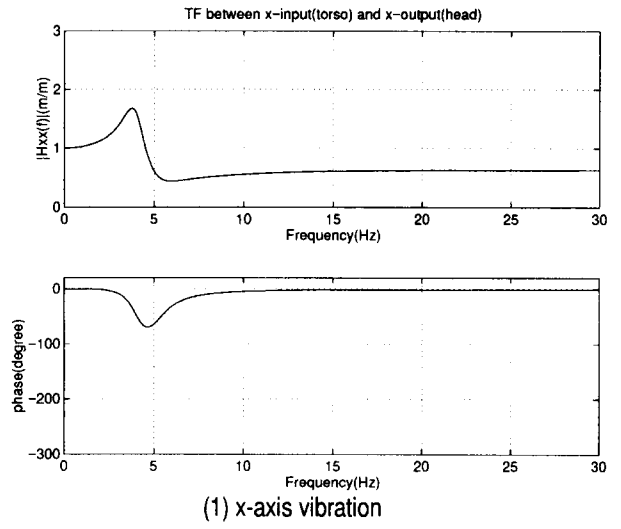
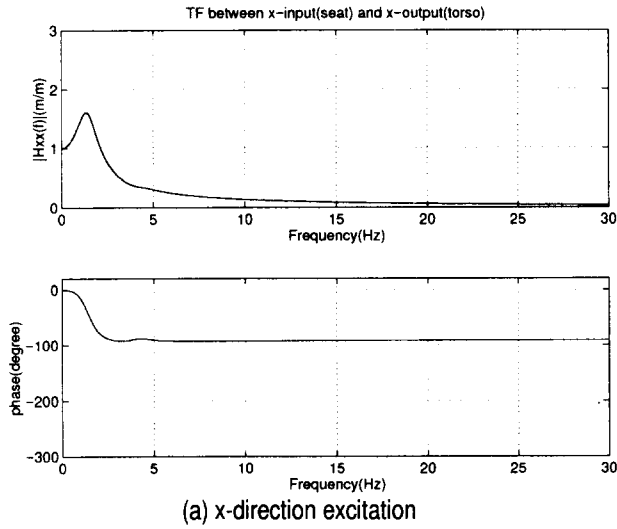


Fig. 4 Vibration transfer characteristics of excitation table to torso(Tamaoki's model)

Fig. 5 Continual

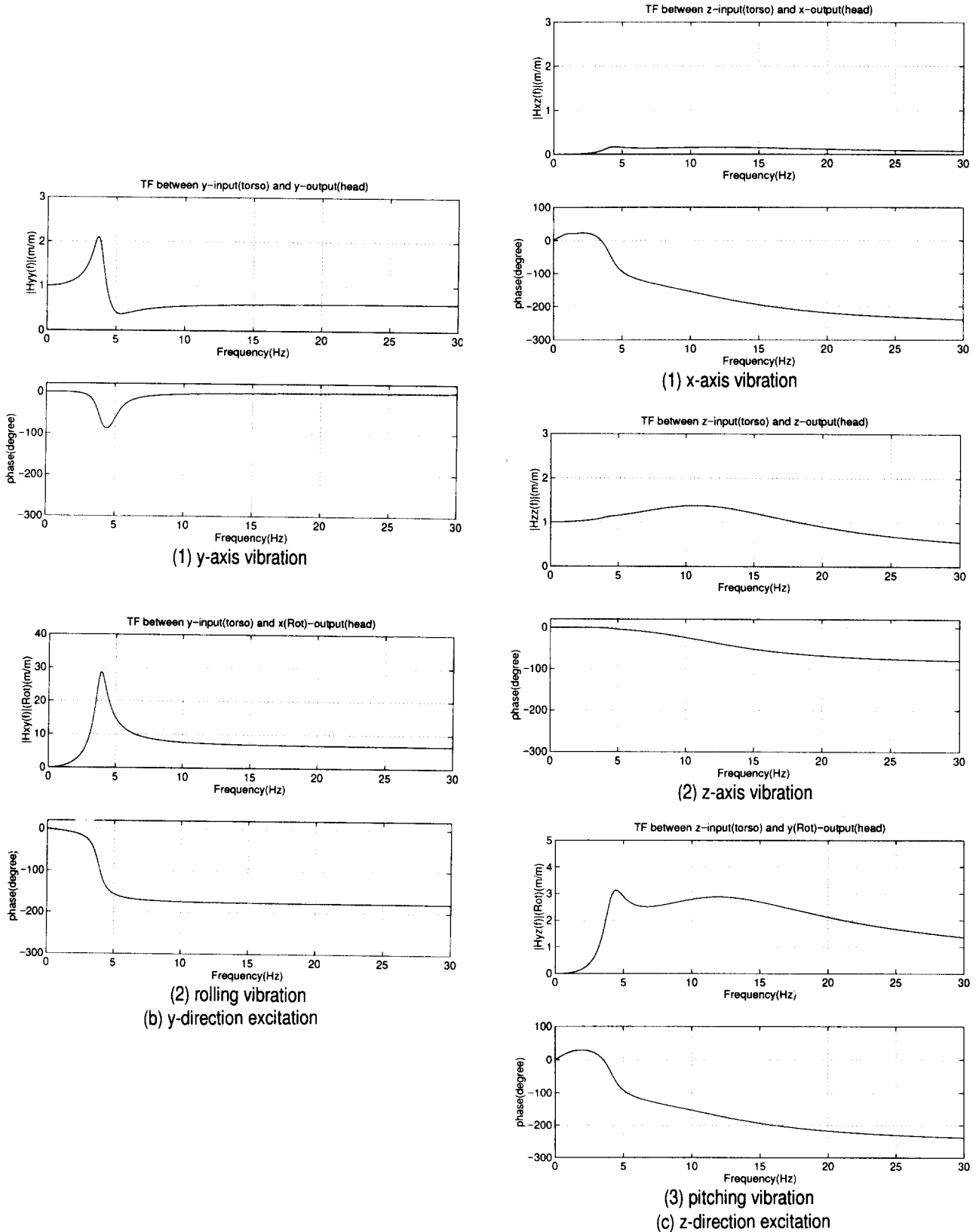


Fig. 5 Vibration transfer characteristics of torso to head(Tamaoki's model)

은 미미하다고 볼 수 있다. 따라서, 머리 부분의 진동 특성은 주로 엉덩이와 가슴 사이의 진동 특성에 기인한다고 생각된다.

Tamaoki 등이 진동모델(Fig. 2)의 가진 테이블과 몸통 사이의 진동 전달특성은 Fig. 4에, 몸통과 머리 사이의 진동 전달 특성은 Fig. 5에, 가진 테이블과 머리 사이의 진동 전달특성은 Fig. 6에 각각 보이고 있다. 이들 각각의 그림은  $x$ 축,  $y$ 축, 그리고  $z$ 축의 독립된 가진에 의한 진동 전달특성으로 세분화된다. 이렇게 세분화된 Figs. 4~6의 공진주파수(resonant frequency)와 진동 이득율(gain)은 Table 4와 같다.

특히, Tamaoki 등이 진동계의 가진 방향 즉,  $x$ 축,  $y$ 축, 그리고  $z$ 축에 대한 진동 전달특성은 Amirouche 등이 진동계의 가진 및 운동 방향 즉,  $z$ 축만의 진동 전달특성과는 달리, 인체 각 부분 사이의 병진 및 회전운동의 진동 특성이 복합적으로 연결(coupled)되어 있기 때문에, 이들 3가지의 독립된 가진 방향에 대한 특성은 다음과 같다.

### 3.1 $x$ 축 방향만의 가진

가진 테이블과 머리 사이의  $x$ 축 방향 진동 특성(Fig. 6(a1))은 가진 테이블과 몸통 사이의  $x$ 축 방향 진동 특성(Fig. 4(a))의 영향에 기인하는 것으로 여겨지며, 몸통과 머리 사이의  $x$ 축 방향 진동 특성(Fig. 5(a1))의 영향은 미미함을 알 수 있다. 이것은 Table 4의 1행에 보인 바와 같이 몸통과 머리 사이의 공진주파수(4 Hz)와 가진 테이블과 몸통 사이의 공진주파수(1.5 Hz)가 다르기 때문이다. Table 4의 3행에 보인 바와 같이 가진 테이블과 머리 사이의  $z$ 축 방향 진동 특성(Fig. 6(a2))는 몸통과 머리 사이의  $z$ 축 방향 진동 특성(Fig. 5(a2))의 영향에 기인하는 것으로 여겨진다. Table 4의 2행에 나타난 바와 같이  $x$ 축 가진 방향과 인체 각 부분의  $y$ 축 방향 진동은 서로 비연성(uncoupled)되어 있다.

### 3.2 $y$ 축 방향만의 가진

가진 테이블과 머리 사이의  $y$ 축 방향 진동 특성(Fig. 6(b1))은 가진 테이블과 몸통 사이의  $y$ 축 방향 진동 특성(Fig. 4(b))의 영향에 기인하는 것으로 여겨지며, 몸통과 머리 사이의  $y$ 축 방향 진동 특성(Fig. 5(b1))의 영향은 미미함을 알 수 있다. 이것은 Table 4의 7행에 주어진 바와 같이 몸통과 머리 사이의 공진주파수(4 Hz)와 가진 테이블과 몸통 사이의 공진주파수(1.5 Hz)가 일치하지 않기 때문이다. Table 4의 6행과 8행에 보인 바와 같이  $y$ 축 가진 방

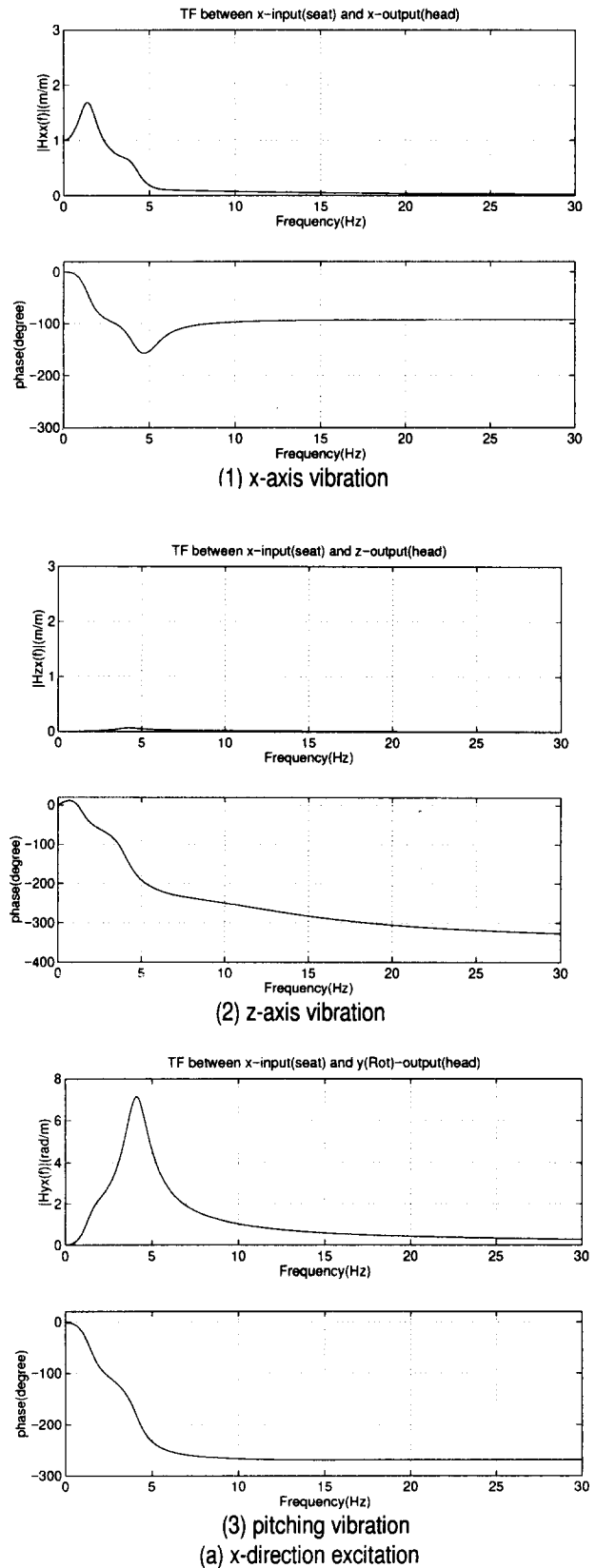


Fig. 6 Continual

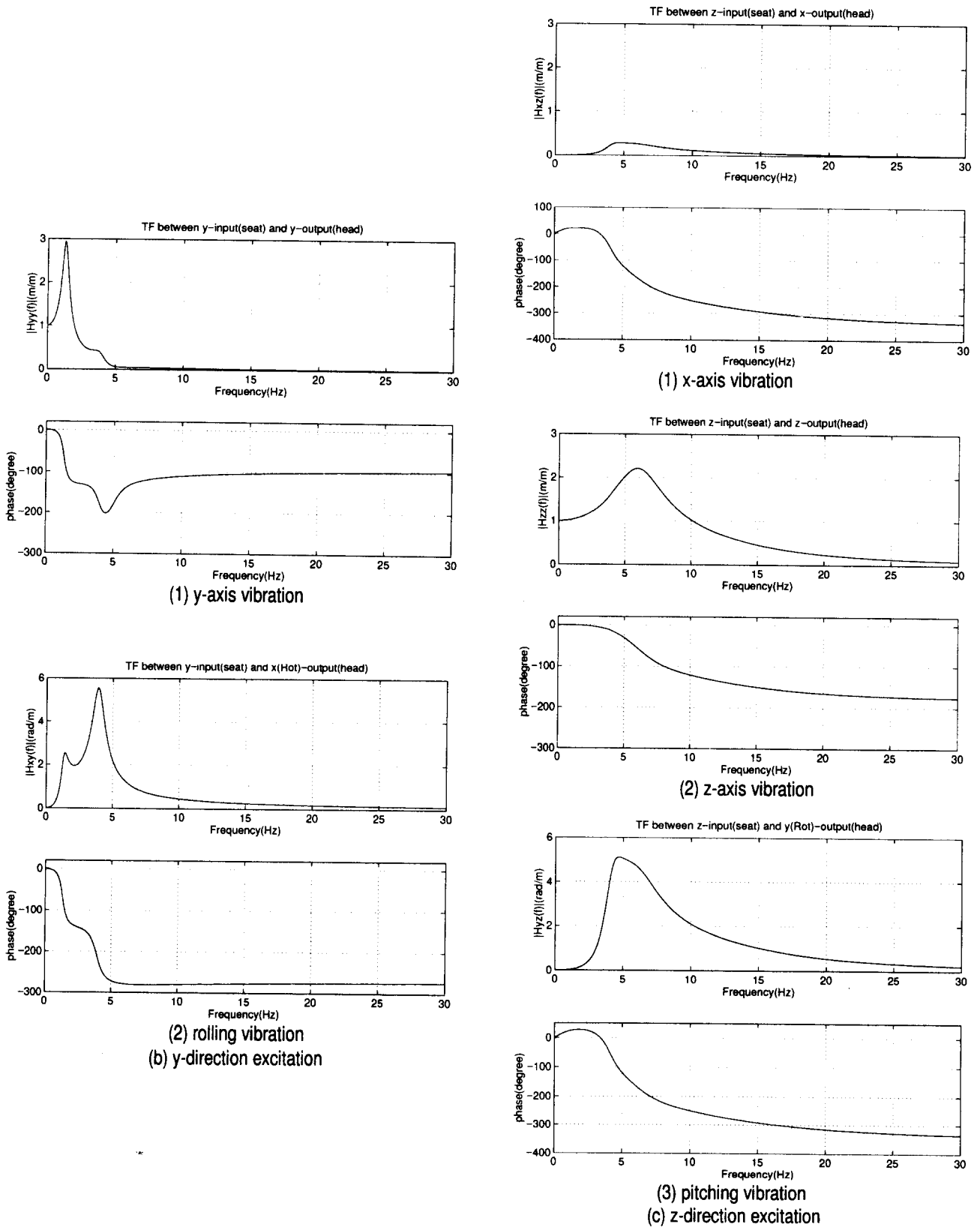


Fig. 6 Vibration transfer characteristics of excitation table to head(Tamaoki's model)

**Table 4** Comparison of the resonant frequencies(Hz) of Tamaoki's model

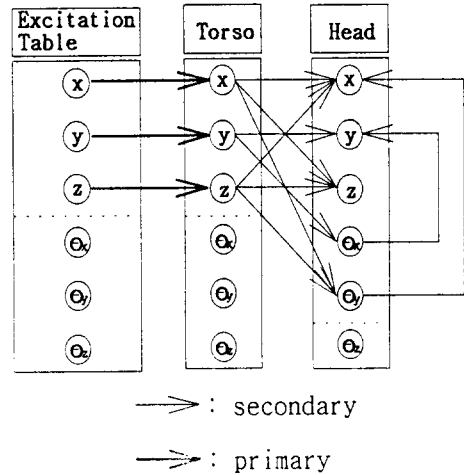
Input output	Excitation table torso		Torso head		Excitation table head	
	$f_n$ (Hz)	gain	$f_n$ (Hz)	gain	$f_n$ (Hz)	gain
x-x	1.5	1.6	4	1.6	1.5	1.7
x-y	??	??	-	-	-	-
x-z	??	??	4.5	0.2	4.5	0.1
x- $\theta_x$	??	??	-	-	-	-
x- $\theta_y$	??	??	4.5	20*	4.5	7*
y-x	??	??	-	-	-	-
y-y	??	??	4	2.1	1.5	3
y-z	??	??	-	-	-	-
y- $\theta_x$	??	??	4	28*	1.5, 4	2.2, 5.5*
y- $\theta_y$	??	??	-	-	-	-
z-x	??	??	4.5	0.2	4.5	0.3
z-y	??	??	-	-	-	-
z-z	??	??	12	1.3	6	2.2
z- $\theta_x$	??	??	-	-	-	-
z- $\theta_y$	??	??	4.5, 12	3.2, 2.9*	4.5	5.2*

- : uncoupled term  
 ?? : unconsidered term  
 \* : unit(rad·s<sup>-2</sup>/m·s<sup>-2</sup>)

향과 인체 각 부분의 x축 및 z축 방향 진동은 서로 비연성(uncoupled)되어 있다.

**3.3 z축 방향만의 가진**

Table 4의 11행에 보인 바와 같이 가진 테이블과 머리 사이의 x축 방향 진동 특성(Fig. 6(c1))은 몸통과 머리 사이의 x축 방향 진동 특성(Fig. 5(c1))의 영향에 기인하는 것으로 여겨진다. 가진 테이블과 머리 사이의 z축 방향 진동 특성(Fig. 6(c2))는 가진 테이블과 몸통 사이의 z축 방향 진동 특성(Fig. 4(c))의 영향에 기인하는 것으로 여겨지며, 몸통과 머리 사이의 z축 방향 진동 특성(Fig. 5(c2))의 영향은 미미함을 알 수 있다. 이것은 Table 4의 13행에 주어진 바와 같이 몸통과 머리 사이의 공진주파수(12 Hz)와 가진 테이블과 몸통 사이의 공진주파수(6 Hz)가 일치하지 않기 때문이다. Table 4의 12행에 보인 바와 같이 z축 가진 방향과 인체 각 부분의 y



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

축 방향 진동은 서로 비연성(uncoupled)되어 있다. 위의 분석내용을 간략히 도식화하면 Fig. 7과 같은 진동전달지도(vibration transfer map)로 나타낼 수 있다.

Fig. 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 회전중심 사이의 편심(eccentricity)에 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 등이 진동계의 진동 전달특성과 같이, 머리 부분의 진동 특성이 몸통 부분의 진동 특성이 영향에 기인한다고 생각된다.

하지만, Tamaoki 등가 진동계는 몸통 부분의 병진운동만 고려했을 뿐, 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



진동계들의 진동응답 특성분석으로부터, 머리 부분의 진동은 주로 몸통 부분의 진동 특성에 좌우됨을 새로이 확인할 수 있었다. 이러한 사실로부터 주행 중인 자동차의 승차감(ride quality) 개선은 일차적으로 몸통 부분에 전달되는 진동경로의 효율적 차단으로 이루어질 수 있다는 점 또한 이해할 수 있었다. 기존의 Amirouche와 Tamaoki의 등가 진동계는 몸통부의 병진운동 성분만을 고려하였으나, 현재 진행 중인 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.

### 참고 문헌

- (1) Coermann, R. R., 1961, "The Mechanical Impedance of the Human Body in Sitting and Standing Position at Low Frequencies," Wright-Patterson Air Force Base, ASD-TR 61-492.
- (2) Fairley, Thomas E and Griffin, Michael J., 1989, "The Apparent Mass of the Seated Human Body : Vertical Vibration," *Journal of Biomechanics*, Vol. 22, No. 2, pp. 81~94.
- (3) Donnati, P. M. and Bonthoux, C., 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, ISO 7962, "Mechanical Vibration and Shock-Mechanical Transmissibility of the Human Body in the z Direction."
- (5) International Organization for Standardization, ISO 5982, "Vibration and Shock-Mechanical Driving Point Impedance of the Human Body."
- (6) Amirouche, F. M. L. and Ider, S. K., 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) Griffin, M. J., 1990, *Handbook of Human Vibration*, Chap 8, Academic Press, London.
- (8) Tamaoki, G. and Yoshimura, T., 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.