한국소음진동공학회 2013년 추계학술대회논문집, pp. 174~175

# 비선형 효과가 인체 진동 모델의 진동 특성에 미치는 영향 분석

## Analysis of nonlinear effect on vibration characteristics of human vibration model

조영남* · 강문정* · 유홍희†

**Young Nam Jo, Moon Jeong Kang and Hong Hee Yoo**

## 1. 서 론

차량이나 기차, 선박, 비행기 등에 탑승 시 인체에 가해지는 진동은 불쾌감이나 피로감, 작업 능률 저하 또는 질병의 원인이 되기도 한다. 따라서 인체에 좋지 않은 영향을 미치는 진동을 규명하고 그러한 진동을 줄이기 위한 연구가 많이 수행되어 왔다. 인체에 해로운 영향을 끼치는 진동을 규명하기 위해 피험자를 대상으로 실험을 하는 방법은 시간과 노력이 많이 들어갈 뿐만 아니라 강한 진동의 경우 인체의 손상을 유발할 수 있기 때문에 위험하다. 따라서 인체의 진동 특성을 잘 표현할 수 있는 인체 진동 모델을 이용해 진동이 인체에 미치는 영향을 평가하는 연구가 진행되어 왔다. 이러한 인체 진동 모델은 대부분 몇 개의 강체 및 스프링-댐퍼를 이용하여 모델링 되었다. 또한 진동이 인체에 미치는 영향은 가진점에서의 겉보기 질량(apparent mass), 인체 각 부위의 가속도 전달률(acceleration transmissibility)을 이용해 평가되고 있다. 인체 진동 모델을 이용한 많은 연구들에서 이러한 진동 특성을 계산할 때 인체 모델의 운동방정식을 유도하고 선형화 과정을 거쳐 계산하고 있다. 본 연구의 목적은 Matsumoto(2001)가 제안한 인체 진동 모델을 이용해 선형화 과정이 겉보기 질량 및 가속도 전달률 계산에 미치는 영향을 살펴보고 선형화를 수행하는 것이 타당한지 분석하는 것이다.

## 2. 해석 방법

### 2.1 Matsumoto의 인체 진동 모델

Matsumoto의 인체 진동 모델은 5개의 강체 및 스프링-댐퍼로 구성되어 있다(Figure 1). 이 모델에서 1번 강체는 다리를, 2번 강체는 L5에서 골반을, 3번 강체는 T11에서 L3까지를, 4번 강체는 장기를, 5번 강체는 머리에서 T10까지를 나타낸다. 또한 스프링 및 댐핑계수는 겉보기 질량 및 가속도 전달률의 인체 실험 결과와 진동모델 해석 결과 사이의 오차가 최소화 되도록 최적화 방법을 이용해 결정되었다. 이 값들은 Matsumoto(2001) 논문에 자세히 제시되어 있다.

의자에서 수직 방향의 진동이 인체에 가해질 때 이 모델이 운동방정식은 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$\mathbf{M}\ddot{u} + \mathbf{C}\dot{u} + \mathbf{K}u = \mathbf{A}_a\ddot{z}_b + \mathbf{A}_v\dot{z}_b + \mathbf{A}_d z_b$$

여기서 $\mathbf{M},\mathbf{C},\mathbf{K}$는 각각 질량, 강성, 감쇠행렬, $\ddot{u},\dot{u},u$는 각각 가속도, 속도, 변위행렬, $\ddot{z},\dot{z},z$는 각각 의자의 가속도, 속도, 변위이다. 이 운동방정식들은 단순화를 위해 선형화되었고 겉보기 질량 및 가속도 전달률은 해석적 방법으로 구해졌다.

### 2.2 비선형성을 고려한 해석 방법

인체 진동 모델의 비선형성을 고려하기 위해 Matsumoto의 진동 모델을 상용 동역학 해석 코드(RecurDyn)를 이용해 과도해석을 수행하였다. 이 과정에서 의자에 가해지는 진동은 의자의 수직 방

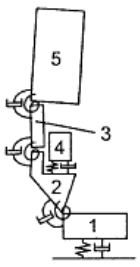


**Figure 1** Human vibration model

† 한양대학교 기계공학부
E-mail : hhyoo@hanyang.ac.kr
Tel : 02-2220-0446, Fax : 02-2299-8169
* 한양대학교 기계공학과

향 변위를 사인(sine)함수의 형태로 가진하였다. 가해준 사인함수의 형태는 아래와 같다.

$$z_b(m) = 0.01\sin\omega_b t$$

여기서 $\omega_b$는 가진주파수로 0.5~20Hz까지 0.5Hz 간격으로 가진하였다.

겉보기 질량 및 가속도 전달률은 정상상태 구간에서 의자 및 인체 모델 각 부위의 가속도의 진폭 및 의자를 가진시키기 위한 구동력의 진폭을 이용하여 구하였다.

## 3. 해석 결과

비선형효과를 고려한 결과와 고려하지 않은 결과를 figure2에 나타내었다. 첫 번째 그래프는 가진점에서의 겉보기 질량을 나머지 그래프는 인체 진동 모델 각 부위에서의 수직, 전후방향의 가속도 전달률이다. 또한 실선은 비선형 효과를 고려하지 않은 Matsumoto의 결과이고 점들은 비선형 효과를 고려한 과도해석 결과이다. 두 결과를 비교해보면 대부분 매우 잘 일치하는 것을 알 수 있다. 하지만 척추의 L1부분에서의 전후방향 전달률은 4~6Hz 부근

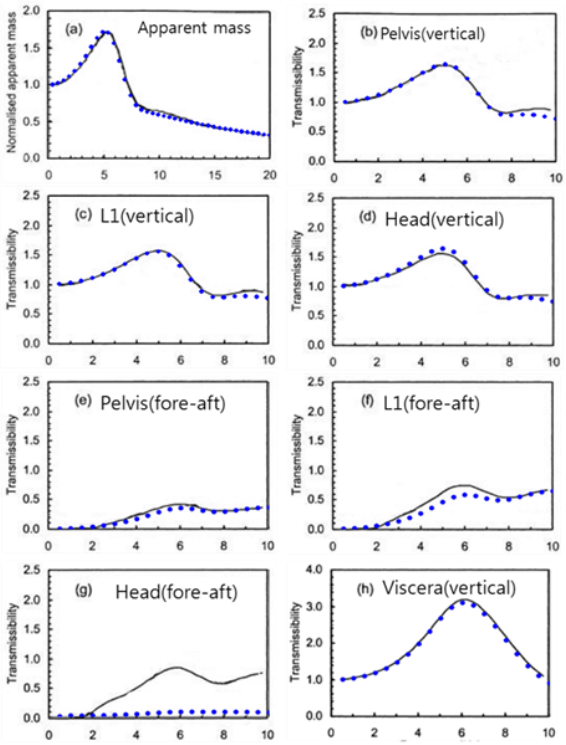


**Figure 2** Analysis results

에서 어느 정도 오차가 있었고 머리의 전후방향 전달률은 선형 결과와 많은 차이를 보이는 것을 확인할 수 있었다. 겉보기 질량이나 다른 위치, 방향의 전달률은 상당히 잘 일치하는 것으로 보아 머리의 전후방향 전달률의 오차는 선형화 때문에 발생한 것은 아니라고 판단된다. 머리부분에서의 진동을 살펴보면 머리의 무게가 상대적으로 무거워 병진운동보다 머리의 무게중심점을 중심으로 한 회전운동이 지배적으로 나타나는 것을 확인할 수 있었는데 머리 부분의 가속도 측정 위치가 머리의 무게중심점 근처에 있기 때문에 전후방향 가속도는 상대적으로 작아 본 연구에서는 가속도 전달률 역시 작게 계산되었다. 이에 미루어 보아 Matsumoto의 논문에 표기된 가속도 측정 위치가 잘못 표기되었거나 그 지점의 가속도를 계산하는 과정에서 오류가 있었을 것이라고 판단된다. 실제로 가속도 측정 위치를 Matsumoto의 논문에 표기된 점이 아닌 그보다 아래 부분에서 측정했을 때 즉, 머리의 무게중심점에서 어느 정도 떨어진 지점에서 측정했을 때 Matsumoto의 결과와 상당히 유사한 결과가 얻어지는 것을 확인할 수 있었다.

## 4. 결 론

본 연구에서는 Matsumoto의 인체 진동 모델 연구 결과를 바탕으로 진동모델의 겉보기 질량 및 가속도 전달률을 구할 때 비선형 효과의 크기를 분석해 보았다. 그 결과 머리의 전후방향 가속도 전달률을 제외하면 대부분의 경우에 큰 차이가 발생하지는 않는 것을 확인할 수 있었으며 따라서 이런 종류의 인체 진동 모델을 해석할 때 비선형 효과를 고려하지 않아도 결과에 큰 영향을 미치지는 않을 것으로 판단된다. 머리의 전후방향 가속도 전달률에서 발생한 큰 오차는 선형화 때문이 아닌 해석 상의 오류 또는 가속도 측정 위치의 오류 때문에 발생한 것이라고 생각된다. 하지만 진폭이 큰 진동에 노출되어 인체의 움직임이 커질 때에는 비선형 효과도 그에 따라 커질 것이므로 비선형 효과가 고려되어야 할 것이다.

## 후 기

이 논문은 2013년 국방과학연구소 생존성 기술특화연구센터의 사업으로 지원받아 연구되었음.