

인체진동의 주관적평가에 관한 연구

°장한기*, Michael J. Griffin**

Subjective Estimation of Comfort of a Seated Human Body due to the Vertical Vibrations

Han-Kee Jang, Michael J. Griffin

ABSTRACT

차량에서 인체가 노출되는 진동환경으로서 좌석과 바닥에서의 진동사이의 위상차가 존재하는 경우에 대한 인체의 반응을 주관평가 실험을 통해 분석하였다. 인체가 진동에 민감하게 반응할 뿐만 아니라 인체와 좌석으로 구성되는 진동시스템의 공진주파수와 관련된 2.5, 3.15, 4, 5, 6.3Hz의 주파수에서, 진동의 크기를 각각 0.25, 0.4, 0.63, 1.0, 1.6m/s²로 변화시켜 가며 위상차가 인체의 안락성에 어떻게 영향을 미치는지를 분석하였다. 두 진동간의 위상차는 진동량이 적을수록, 또 주파수가 낮을수록 인체의 안락성에 악영향을 미쳤다. 진동의 진폭이 0.25m/s²일 때 위상차가 180°인 경우의 불편함은 0°인 경우보다 2.5배 정도 큰 것으로 나타났다. 특히 현가장치가 장착된 의자의 경우에는 좌석과 바닥진동의 위상차이가 안락성에 미치는 영향을 정량적으로 파악하여 인체-좌석 시스템의 공진주파수를 선정해야 함을 알 수 있다.

1. 개요

차량좌석에 앉아있는 인체에 전달되는 진동은 좌석뿐만 아니라 바닥과 운전대 등을 통해 손과 발로 전달된다. 차량의 승차감을 향상시키기 위해서는 이들 진동의 영향평가가 필수적인데, 진동환경에 대한 인체의 반응에 관해 비교적 상세히 정리되어 있는 영국의 규격

(BS6841)을 살펴 보면, 진동이 인체로 전달되는 각 부위에서 진동을 측정하고 해당 가중치를 각각 적용하여 각 부위에서의 승차감지수(point ride value)를 구한 뒤, 이들 값을 RSS(root sum of square)방법으로 합산하여 종합 승차감지수(overall ride value)를 결정하고 있다[1,3]. 그러나 이 과정에서는 각 부위에서 측정된 진동 간의 위상 정보를 전혀 고려하지 않고 단순히 크기만으로 그 결과를 구하기 때문에 실제의 진동환경을 대변하는데 충분치 않다. 실제 차량에서는 좌석과 바닥이 항상 같

* 고등기술연구원 자동차기술연구소

** Human Sciences Group, ISVR, Univ. of Southampton, U.K.

은 방향으로(in-phase) 진동하는 것이 아니고 주파수에 따라 서로 반대 방향으로(out-of-phase)으로 진동하는 경우도 흔히 있다. 본 실험에서는, 이와 같이 실제 차량 좌석에서의 진동환경과 유사한 경우, 즉 좌석과 바닥 진동 사이에 위상(phase)차가 존재하는 경우에 대해, 이들이 인체의 안락성에 미치는 영향을 규명하고자 하였다.

2. 위상차의 영향 규명을 위한 주관 평가 실험

2.1. 실험개요 및 조건

본 실험에서는 특정 진동주파수와 진동량 범위에서 좌석과 바닥, 두 진동 사이의 위상차가 안락성에 미치는 영향을 파악하였다. 이를 위해 선정된 해당 실험인자들의 범위는 각각 다음과 같다.

- * 주파수 : 2.5, 3.15, 4, 5, 6.3 (Hz)
- * 진동진폭 : 0.25, 0.4, 0.63, 1.0, 1.6 (m/s^2)
- * 좌석과 바닥 진동의 위상차 : 0, 30, 60, 90, 120, 150, 180°

실험은 두 번으로 나누어서 수행하였는데 1차 실험에서는 주파수를 4Hz로 고정시키고 5가지의 진동진폭과 7가지의 위상차이에 대한 안락성의 변화 추이를 관찰하였다. 2차 실험에서는 1차 실험에서 확인된 결과를 바탕으로 위상차이의 경우의 수를 0°, 180° 두가지로 줄이고, 대신 주파수 변화에 따른 효과를 살펴 보기 위해 주파수의 범위를 5가지로 확대하였다. 다양한 실험조건에 대한 인체의 주관적인 평가를 분석하기 위해 기준신호와 테스트신호에 대한 반응을 정량적으로 상호비교하는 paired comparison법을 채택하였다[4]. 전체 실험을

통해 기준 진동신호는 일정하게 유지하는데, 주파수는 4Hz, 진폭은 $0.25m/s^2$, 위상차는 0°인 좌석과 바닥의 동시 진동신호로 하였다. 테스트 신호의 진동진폭이나 주파수를 변화시킬 때에도 좌석진동과 바닥진동의 진폭은 서로 크기가 동일하게 유지하였으며, 두 진동사이의 위상을 각각 변경시키면서 실험을 진행하였다.

2.2. 실험장치 및 가진신호 발생

Figure 1은 본 연구에서 수행한 실험장치를 나타낸다. 좌석과 발판에 연결된 2대의 대형 가진기를 각각 가진하기 위해서 ISVR연구진이 인체진동해석을 위해 개발한 HVLab시스템으로부터 가진 신호를 발생시켰으며 이를 저주파수 대역 필터를 통과시켜 가진기 앰프에 입력되도록 하였다.

본 실험에서는 기준신호와 테스트신호를 비교, 평가하기 위해서 기준신호와 테스트신호를 이어서 발생시키고 이를 2회 반복함으로써 평가자가 보다 확실하게 평가할 수 있도록 하였다. 이와 같이 인체에 진동을 가한 후, 평가자는 기준신호에 의한 안락성의 크기를 100으로 하고 테스트 신호에 의한 안락성을 상대적으로 평가하도록 하였다. 만일 테스트 신호가 기준 신호의 경우보다 두배의 불편함을 주는 경우는 200, 절반정도의 불편함을 주면 50으로 판단하도록 하였다.

2.3. 실험결과 분석

2.3.1. 위상차가 안락성에 미치는 영향분석

우선 좌석과 바닥진동의 위상차가 과연 인체의 안락성에 영향을 미치는지의 여부를 확인하기 위해서 가설검증(hypothesis test)을 수행하였다. 인체가 진동에 가장 예민한 주파수 영역에 속하는 4Hz에서 5가지 진동 진폭의 경

우에 대해 12명의 표본을 대상으로 위상차가 0°인 경우와 위상차가 각각 30, 60, 90, 120, 150, 180°인 경우를 각각 비교하였다. 이를 위하여 다음과 같은 가설을 설정하였다.

<가설> 좌석진동과 바닥진동 사이에 위상차가 있는 경우 인체가 느끼는 불편함은 위상차가 없는 경우보다 더 크다.

위의 가설을 검증하기 위해서 두가지 경우(위상차가 없는 경우와 있는 경우)에 대한 12명 평가결과를 직접 비교하는 방법의 일환으로 Wilcoxon's matched-pair signed-ranks test를 사용하였다. 이 방법은 서로 상관관계가 있는 두 별의 데이터간의 차이를 검증하는데 자주 이용되는 방법이다[4].

각 진동 진폭에 대하여 위상차 없는 경우와 있는 경우의 비교, 평가결과를 표로 정리하면 다음과 같다.

표 1 위상차가 있는 경우와 없는 경우에 대한 주관평가치의 통계분석
(*; p<0.05, **; p<0.01)

	30°	60°	90°	120°	150°	180°
0.25m/s ²	-	-	*	**	-	*
0.4m/s ²	*	*	*	**	*	**
0.63m/s ²	*	*	*	**	*	*
1.0m/s ²	-	-	-	-	-	-
1.6m/s ²	-	-	-	-	-	-

위 표에서 '*'와 '**'표시는 각각 신뢰도 95%와 99%수준에서 위의 가설이 옳다고 판정하는 것을 의미한다. 이 표를 토대로 내릴 수 있는 결론은 첫째, 진폭이 일정량(1.0m/s²) 이상되면 좌석과 바닥진동 사이의 위상차를 제

대로 식별할 수 없다는 것이다. 두 번째로, 위상각의 크기와 관련해서, 진폭이 0.4, 0.63m/s²인 경우에는 위상차이를 30°부터 180°까지 모두 식별할 수 있는 것으로 결과가 나왔다. 이는 평가자가 기준신호로 사용된 해당 진폭의 신호에 익숙해서 위상차이를 잘 분간한 것으로 보인다. 한가지 예외의 경우(0.63m/s², 150°)를 제외하고는, 진폭이 0.63m/s²이하, 위상차가 90°이상에서는 평가자들이 위상차이가 없는 경우(0°)보다 더 불편한 것으로 판단했다는 사실이다. 결론적으로 위상차이가 인체의 안락성에 미치는 영향은 진폭이 작을수록, 또 위상각이 일정량 이상인 경우에 부정적인 방향으로 작용한다는 사실을 확인할 수 있다.

2.3.2. 특정 주파수와 진폭에서 위상차의 영향

Figure 2에는 본 실험에서 관심주파수로 선택한 5가지 주파수에서 위상차이가 각각 0°인 경우와 180°인 경우에 대한 주관평가 결과 진폭의 증가에 따라 도시하였다. 이들 결과를 정리하면 다음과 같다. 첫째, 진동량의 증가에 따라서 인체가 느끼는 전반적인 불편함은, 약간의 편차는 있으나, 선형적으로 비례해서 증가한다는 것이다. 둘째, 위상차가 있는(180°) 경우의 불편함은 4Hz까지 진동진폭에 상관없이 위상차이가 없는(0°) 경우보다 뚜렷하게 나타나고 있다. 그러나 주파수가 5Hz이상인 경우는 인체가 느끼는 불편함이 위상차이에 의한 영향을 별로 받지 않음을 알 수 있다.

2.3.3. 진폭에 대한 주관평가치의 회귀분석

해당 실험조건(주파수와 위상차)에 대하여 인체가 느끼는 불편함과 진동진폭간의 정량적인 관계를 파악하기 위하여 모든 평가자들의 주관평가결과를 진동진폭에 대해 회귀분석하

였다. 일반적으로 사용되는 인체의 안락성(Ψ)과 진동진폭(Φ) 간의 관계식인 $\Psi = K \cdot \Phi^n$ 를 이용하여 상수 K와 n을 곡선 fitting 방식으로 계산하였다[1]. 여기서 의미가 있는 상수는 n으로서 이 값이 클수록 인체의 안락성이 진폭에 더욱 큰 영향을 받는다는 것을 의미한다. 국제표준규격(ISO 2361)을 보면 단일 진동의 경우 인체의 반응이 진동 진폭에 선형적으로 반응하는 것으로 나타나 있다[1,2].

본 연구에서는 과연 좌석과 바닥, 두 지점의 진동이 작용하는 경우에도 인체의 반응이 진동 진폭에 선형적으로 비례하는지를 파악하고자 하였다. 표2에는 5가지의 주파수에서 위상차이가 0° , 180° 인 경우에 대한 회귀분석을 수행하여 진동진폭에의 민감도에 해당하는 급수 n값을 정리하였다. 참고로 급수 n이 1인 경우는 인체의 반응이 진동량의 진폭에 선형비례함을 의미한다.

표2 인체반응과 진동진폭간의 회귀분석 결과 (n)

	2.5Hz	3.15Hz	4Hz	5Hz	6.3Hz
0°	1.12	1.29	1.28	1.06	0.84
180°	0.70	0.87	0.97	1.05	1.00

표2를 보면 전반적으로 급수 n이 1 근처의 값을 가짐을 알 수 있다. 그러나 주파수에 따라 그 값의 차이는 나타나고 있는데, 저주파수, 즉 5Hz까지는 위상차가 없는 경우(in-phase)가 위상이 반대인 경우(out-of-phase)보다 진동진폭에 더 민감함을 알 수 있다. 주파수 상승에 따른 급수 n의 변화추이를 각각 살펴보면 위상차가 없는 경우, 3.15~4Hz를 정점으로 증가하다가 감소하는 경향을 보이고 있고, 반대의 위상차를 갖는 경우, 5~6.3Hz까지 증

가함을 알 수 있다. 특이할 사항으로는, Fig.2의 결과를 보면 가장 낮은 주파수인 2.5Hz에서 위상차의 효과가 가장 큰 반면 진동량의 크기에 대한 민감도는 가장 낮다는 사실이다. 따라서 저주파수 영역에서의 상대진동이 존재할 때는 위상차의 영향을 세심하게 고려해야 함을 알 수 있다.

이 결과들은 좌석과 바닥에서 동시에 진동이 전달될 때, 주파수와 위상에 따라 진동의 크기가 인체의 안락성에 미치는 영향의 정도가 달라진다는 사실을 보여주고 있다. 따라서 두가지 이상의 진동이 인체로 전달될 때, 인체의 반응을 평가하려면 각각의 상황마다 주관평가를 수행하여야 함을 알 수 있다.

3. 결론

본 연구에서는 실제상황과 유사한, 좌석과 바닥사이에 위상차가 존재하는 경우에 대해 주관평가실험을 수행함으로써 인체진동에 대한 주관평가 기법의 적용예를 보이고, 기존의 안락성 평가방법에서의 문제점과 보완되어야 할 부분을 제시하였다. 본 연구에서 수행한 결과를 종합하면 다음과 같다.

- i) 좌석과 바닥 진동사이의 위상차는 인체의 안락성에 부정적인 영향을 미친다.
- ii) 위상차의 영향은 4~5Hz영역 이하에서 두드러지게 나타나고 있으며, 진동주파수가 높아지면 위상의 차이를 잘 식별하지 못하는 것으로 나타났다.
- iii) 진동크기에 대한 인체 안락성의 민감도는, 위상차가 없는 경우 6.3Hz에서 가장 낮았고, 위상이 반대인 경우에는 2.5Hz에서 가장 낮았다. 가장 민감한 영역은 위상차가 없는 경우 3.15~4Hz, 위상이 반대인 경우 5~6Hz 영역

이었다.

기존의 안락성 평가방법에서는 진동이 전달되는 인체 각 부위의 진동을 RSS(root sum of square)방식으로 합산하여 종합 승차감 지수를 환산하였다. 이들 방법은 단순히 크기만을 가지고 인체의 반응을 평가하였으나, 본 실험에서는 서로 다른 부위에 작용하는 진동사이의 위상차가 인체의 반응에 상당한 영향을 미친다는 사실을 입증하였다. 일례로 대형트럭에서와 같이 현가장치가 부착되어 있는 운전석의 경우, 운전자-좌석 계의 공진 주파수가 매우 낮게 설정되어 있으므로(4Hz미만), 공진 주파수 이상에서 좌석과 바닥의 진동 사이에 반대의 위상이 존재하게 된다. 이와 같은 경우에 좌석의 강성을 결정함에 있어 위상차가 인체의 안락성에 영향을 미친다는 사실을 추가

로 고려해야만 피로도가 낮은 좌석을 설계할 수 있다.

<참고문헌>

- [1] M. J. Griffin, Handbook of Human Vibration, Academic Press, 1990.
- [2] International Organization of Standardization, ISO2631/1,2; Evaluation of Human Exposure to Whole Vibration, 1985.
- [3] British Standard Institution, BS6841; Measurement and Evaluation of Human Exposure to Whole-Body Mechanical Vibration and Repeated Shock, 1987.
- [4] W. W. Daniel, Applied Nonparametric Statistics, 2nd ed., PWS-Kent Publishing Company, 1990.

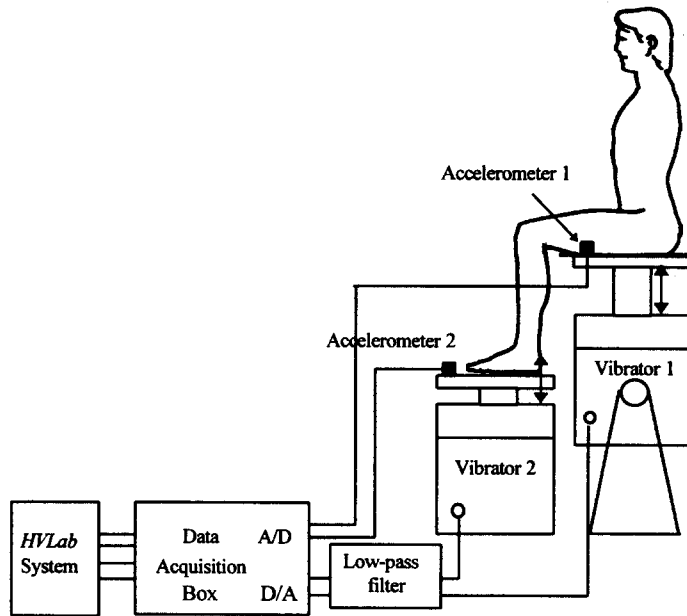


Fig. 1 Experimental configuration for subjective estimation

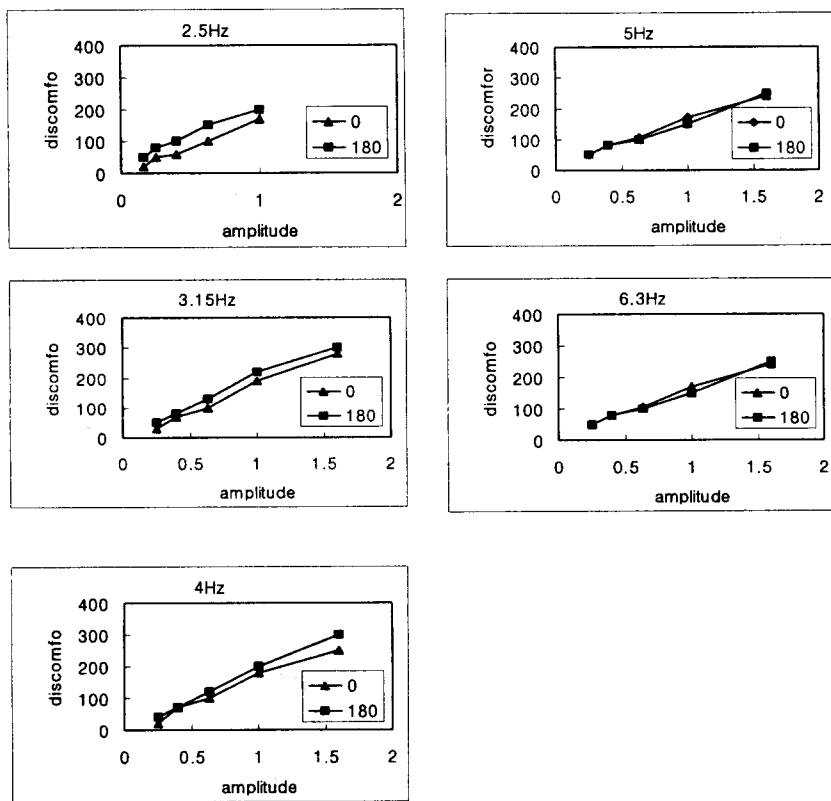


Fig.2 Discomfort of the seated person due to the in-phase motion and the out-of-phase motion with the change of vibration magnitude at various frequencies