농업용 트랙터의 승차감 평가 및 개선방향

김태형* 김선웅** 홍부성** 박세진**
* : 한국과학기술원 **: 한국표준과학연구원

Evaluation of Ride Quality and Improvement of a Farm Tractor

T.H.Kim* S.W.Kim** B.S.Hong** S.J.Park**
* : KAIST **: KRISS

현재 농업용 장비들은 특성상 사용자에게 심한 양의 진동을 가하고 있다. 이는 사용자에게 나쁜 승차감을 주고 또한 장시간 운전시에는 건강에도 좋지 않은 영향을 줄 수 있다. 본 연구에서는 농업용 트랙터에서 사용자에게 전달되는 진동의 양을 측정하여 사용자가 느끼는 승차감을 정량적으로 측정하고 또한 건강에 미칠 수 있는 영향에 대해 평가해 보았다. 실험은 포장도로와 농로 그리고 논갈기 작업시에 인체에 전달되는 12축의 진동을 측정하였고, 또한 트랙터에 사용되는 서스펜션 시트의 특성을 보기 위해 시트 아래의 수직방향 진동을 측정하였다. 실험에 참가한 피실험자는 모두 현재 트랙터를 사용하고 있는 4명을 대상으로 하였다. 실험 결과 현재의 트랙터는 사용자에게 좋지 않은 승차감을 주고 있으며 건강에도 좋지 않은 환경을 제공하고 있음을 볼 수 있었다. 이러한 환경을 개선하기 위해서는 서스펜션 시트의 설계가 중요하게 되는데 보다 좋은 승차감을 제공하기 위해서는 인간이 민감하게 느끼고 또 트랙터에서 많은 양이 나타나는 주파수 대역의 진동을 저감하기 위한 설계가 필요하다고 할 수 있다.

key word : 승차감지수, 진동특성, 의자지수, 서스펜션시트

1. 서론

농업용으로 쓰이는 장비는 작업의 특성상 사용자가 충격과 같은 심한 양의 진동에 노출되어있다. 또한 작업의 특성상 장비에 서스펜션과 같은 진동 감쇄 장치가 부착될 수 없어 작업시 생기게 되는 진동이 바로 사용자에게 전달된다. 따라서 장시간 사용하게 되는 사용자는 진동에 의해 불쾌감이나 피로감을 심하게 느끼게 된다. 현재 장비들은 사용자에게 전달되는 진동을 줄이기 위해 다양한 서스펜션 시트를 사용하고 있다. 그러나 인간이 느끼는 불쾌감이

나 척추 등의 건강에 미치는 악영향을 줄이기 위한 서스펜션 시트의 연구는 아직 부족한 실정이다. 즉 인간이 느끼는 진동에 대한 불쾌감의 정도는 진동의 주파수나 방향에 따라 다르다. 인간이 불쾌하게 느끼게 되는 진동의 주파수는 각 방향에 따라 특정 대역을 이루고 있으며 이러한 범위를 벗어난 진동에 대해서는 불쾌감을 크게 느끼지 못한다. 따라서 서스펜션 시트의 설계시 이러한 인간이 민감한 대역의 주파수의 진동을 줄임으로써 작업 환경을 개선할 수 있을 것이다.

본 연구에서는 인간이 진동의 방향 및 주파수에 따라 느끼는 불쾌감의 정도를 고려하여 진동 승차감과 건강에 미치는 영향을 평가하는 방법에 대해 기술하고 이 방법에 따라 현재 사용되는 농업용 트랙터의 3가지 작업 환경에서의 진동 승차감 지수와 건강에 미치는 영향의 정도를 평가해 보았다. 또한 트랙터 작업시의 인체에 전달되는 진동의 특성을 살펴봄으로써 서스펜션 시트의 설계방향을 제시한다.

2. 승차감 지수

가. 승차감 지수

승차감 지수는 참고 문헌(1)에 자세히 기술되어 있으며, 인체가 느끼는 진동은 식 (1)과 같이 인체에 전달되는 가속도의 제곱 평균의 이승근(root mean square)이며, 이들 가속도는 가진되는 축과 주파수에 따라서 가중치가 다르다는 연구를 바탕으로 제시되어 있다. 본 연구에서는 참고 문헌에서와 같이 12개 축에서의 인체 진동을 가속도로 측정하였다.

$$a_{rms} = \left[\frac{1}{T}\int a_w^2(t)dt\right]^{\frac{1}{2}} \qquad (1)$$

나. 요소 승차감 지수 (Component Ride Value)

각각의 접촉부별 측정축에 대해 서로 독립적으로 승차감에 기여하는 양을 정량화한 것을 요소 승차감 지수라 한다. Table 1.과 Fig. 1에 측정된 12축에 대해 사용되는 주파수 가중 함수(Frequency weighting function)와 축 가중 계수(axis multiplying factor)를 정리하였다. 요소 승차감 지수를 구하기 위해서는 식 (2)와 같이 각각의 측정축에 대해서 측정된 가속도의 전력밀도 함수(Power spectral density) {$P_{ii}(f)$}와 각 측정축 i에 해당되는 주파수 가중 함수의 제곱 $w_i(f)^2$을 이용하여 제곱 평균에 대한 이승근을 취한 값으로 가중화된 i번째 측정축의 실효치를 구한다. 그리고 나서 가중화된 실효치 값에 측정축 i에 대응되는

Table 1 Weighting function and axis multiplying factor in BS 6841

MeasurementPosition	Weighting function (wi)	Axis multyplying factor (mi)
Xf	Wb	0.25
Yf	Wb	0.25
Zf	Wb	0.40
Xh	Wd	1.00
Yh	Wd	1.00
Zh	Wb	1.00
Rx	We	0.63
Ry	We	0.40
Rz	We	0.20
Xb	Wc	0.80
Yb	Wd	0.50
Zb	Wd	0.40

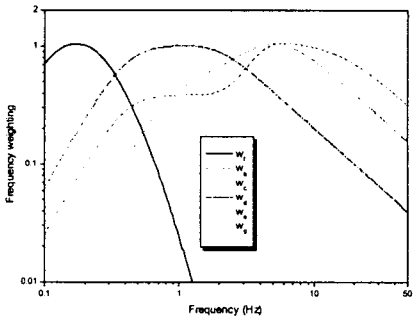


Fig. 1 Frequency weighting function

축 가중 계수(m_i)를 곱해서 각 축에 대한 요소 승차감 지수를 구하게 된다. 이 값을 이용하면 인체 접촉부의 각각 가속도가 승차감에 미치는 상대적 기여도의 정량적 평가가 가능하다.

$$Component\ ride\ value_i = m_i \times \left[\int P_{ii}(f) w_i(f)^2 df\right]^{1/2} \quad (2)$$

다. 전체 승차감 지수 (Overall Ride Value)

전체 승차감 지수는 식 (3)에서와 같이 요소 승차감 지수의 제곱 합의 이승근으로 정의된다. 이 지수는 가중화된 전신 피폭 진동의 총량을 나타내므로 승차감의 대표치라고 할 수 있다. 따라서 이 값이 작을수록 인체에 민감한 진동량이 적어 승차감이 우수하다.

$$Overall\ Ride\ Value = \left[\sum_{i=1}^{N} (Component\ Ride\ Value_i)^2\right]^{1/2} \quad (3)$$

라. 의자 지수 (Seat Effective Amplitude Transmissibility, SEAT)

의자 지수는 식 (4)에서와 같이 의자 하부 지지대의 Zf방향 입력 진동의 실효치에 대한 엉덩이 Zs방향 입력 진동의 실효치의 비로 정의된다. 의자 하부 지지대의 가진 입력 가속도 전력밀도함수{Pff(f)}와 운전자의 엉덩이 Zs방향의 가속도 전력밀도함수 {Pss(f)} 에 Zs방향의 가중함수 제곱 $w_b(f)^2$을 각각 곱한 뒤, 이를 이용하여 관심 주파수 대역에서 의자 지지대 및 엉덩이 부위의 제곱 평균 가속도 값을 각각 계산한다. 이들의 이승근의 비를 환산하여 의자 지수를 얻게 된다.

$$SEAT = \left[\frac{\int P_{ss}(f) w_b(f)^2 df}{\int P_{ff}(f) w_b(f)^2 df}\right]^{1/2} \quad (4)$$

이 값이 1 이하면 시트가 진동을 감쇄함을 의미하며 1 이상이면 시트가 진동을 오히려 크게 함을 의미한다. 그러므로 의자지수가 작을수록 우수한 시트라고 할 수 있다.

마. 진동이 건강에 미치는 영향

지속적인 진동에 피폭되었을 경우 사람은 척추나 척추에 연결된 신경조직에 악영향을 받게 된다. 국제규격(ISO 2631 :1997)에서는 피폭된 진동의 양과 건강의 관계를 기술하고 있다. 사람이 앉은 표면에서의 세 방향 가속도에 주파수 가중함수와 축 가중계수를 고려하여 전체승차감 지수를 구하는 방법과 같이 a_w(weighted r.m.s. acceleration)을 구하여 식 (5)를 이용하여 건강에 주의가 필요한지를 판단한다. 즉 엉덩이로 전달되는 에너지가 적정 수준은 넘어서면 인체에 악영향을 줄 수 있다고 규정하고 있다.

$$a_w \cdot T^{\frac{1}{2}} \quad or \quad a_w \cdot T^{\frac{1}{4}} \quad (5)$$

T : working time

위 식에서 a_w는 엉덩이에서의 3방향 가속도로 구해지는데 주파수 가중함수는 Table 1. 에 나타난 Wd와 Wb를 각각 엉덩이의 x,y 방향과 z 방향에 이용한다. 축 가중 계수는 x,y,z 방향 각각 1.4, 1.4, 1의 값을 이용하여 구해진다.

3. 실험 과정

4기통 디젤엔진을 장착한 출력 50마력의 농업용 트랙터에 대해 3가지 작업 조건에서 인체에 전달되는 12축 가속도를 측정하였다. 또한 서스펜션 시트의 서스펜션에 의한 진동 특성과 쿠션에 의한 특성을 살피기 위해 시트의 서스펜션과 쿠션 사이에 수직방향의 가속도를 측정하였다. 실험에

이용된 인체 진동 측정 장치는 발 부위의 병진 진동과 시트 쿠션 아래의 수직 방향 진동 측정을 위해서는 B&K 4326 3축 가속도 센서를 이용하였고, 엉덩이와 등 부위의 병진 진동은 초소형 반도체 Bridge형 3축 가속도 센서를 사용하였다. 엉덩이의 회전 가속도는 회전 가속도 센서 (Columbia Research Model: SR-207HP)를 이용하였다. 총 13축 신호는 신호 증폭기로 증폭되어 16채널 디지털 기록기(Sony DAT 126A)를 이용하여 6khz로 약 2분 동안 기록하였다. Fig. 2 는 트랙터에 장착된 측정 장치를 보여주고 있다.

실험에 참가한 피실험자는 4명으로 개인의 신체 조건은 Table 2 에 표시하였다. 3가지 주행 조건은 포장도로(A)와 농로(B)를 각각 14km/h 와 10km/h의 속도로 주행할 때와 쟁기를 연결하여 논갈기 작업(C) 중일 때의 진동을 측정하였다. 3가지 작업 과정은 Fig. 3의 (a),(b),(c)에 보여주고 있다.

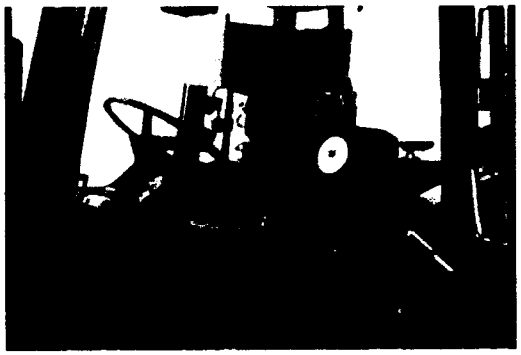


Fig. 2 Experimental setup

Table 2. height and weight of the subjects

subject	Height(cm)	weight(kg)
A	173	87
B	167	63
C	167	62
D	182	82

4. 결과 및 고찰

가. 도로 조건에 따른 진동

본 실험의 대상으로 한 세가지 작업 환경에서 도로 조건에 따라 차체로 전달되는 진동의 양을 비교하기 위해 트랙터 바닥의 수직방향 진동을 비교하였다. 포장도로의 경우 바닥의 수직방향 가속도의 이승근(rms) 값이 1.76m/s2 ± 0.233 의 정도이고 농로에서 주행 할 경우 이보다 많은 2.99m/s2 ± 0.109 그리고 논갈기 작업의 경우 3.25m/s2 정도의 진동이 차체 바닥에 전달되고 있다. 이는 불규칙한 농로를 지날 때 사용자가 심한 진동을 느끼게 됨을 알 수 있고, 논갈기 작업의 경우 주행 속도는 느리나 작업시 충격 등에 의해 많은 수치가 나타나고 있음을 볼 수 있다.

(a) driving on road A (b) driving on road B (c) working on the farm C

Fig. 3 Three driving test in three different works

나. 인체 접촉부의 진동 특성 고찰

Fig. 4 와 Fig. 5 는 포장도로와 농로에서 12축의 인체 접촉부 가속도 이승근의 값을 표시하고 있다. 진동의 양이 농로에서 크게 나타나고 모든 도로에서 앞 뒤 방향과 좌우 방향의 가속도도 크게 나타나고 있다. 또한 농로에서는 울퉁불퉁한 노면으로 엉덩이에서의 회전가속도도 크게 나타나고 있음을 볼 수 있다. Fig. 6 에서는 발에서의 Z방향과 엉덩이에서의 Z방향 가속도의 전력밀도함수와 이 두 가속도 사이의 전달함수를 보여주고 있다. 약 3~5hz 사이의 진동이 심하게 전달되고 있으며 전달함수도 이 구간에서 1을 넘어 진동이 증폭되고 있음을 알 수 있다. 따라서 이 구간의 진동을 감쇄할 수 있는 시트가 사용되면 인체에 전달되는 진동을 많이 줄일 수 있을 것이라는 것을 알 수 있다.

다. 승차감 지수의 분석 결과

Fig. 7은 포장도로와 농로에서 구해진 각 방향의 요소 승차감 지수와 전체 승차감 지수를 표시하고 있다. 일반적인 자동차의 경우 발과 엉덩이의 수직방향과 등에서의 전후 방향의 진동이 승차감에 크게 영향을 미친다. 트랙터의 경우에도 비슷한 결과를 보이고 있으나 농로에서나 작업시에는 좌우 방향 진동이 심하여 엉덩이의 좌우 방향 진동도 승차감에 많은 영향을 주고 있다. 승차감 지수의 평균은 포장도로에서 1.36m/s2 농로에서 3.50m/s2 그리고 논갈기 작업시 1.92m/s2 의 결과를 보인다. 이는 참고문헌 (2)의 진동에 의한 불쾌감을 나타내는 언어로 각각 불편함(uncomfortable), 지극히 불편함(extremely uncomfortable) 그리고 아주 불편함(very uncomfortable)으로 표현할 수 있다.

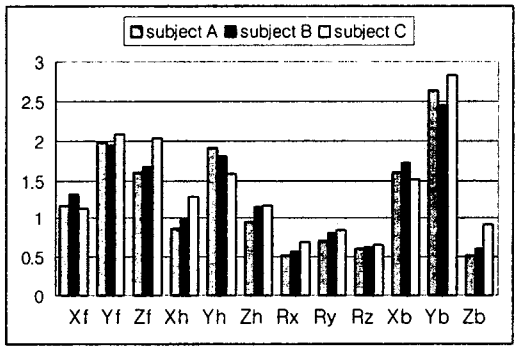


Fig. 4 acceleration rms on road A

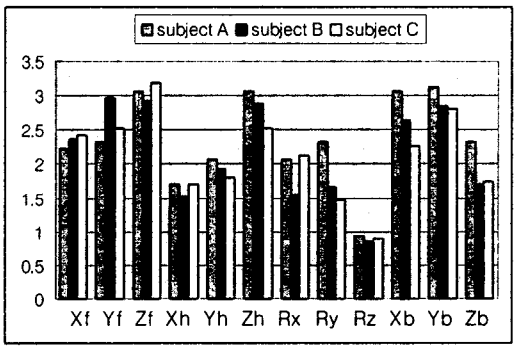


Fig. 5 Acceleration rms on road B

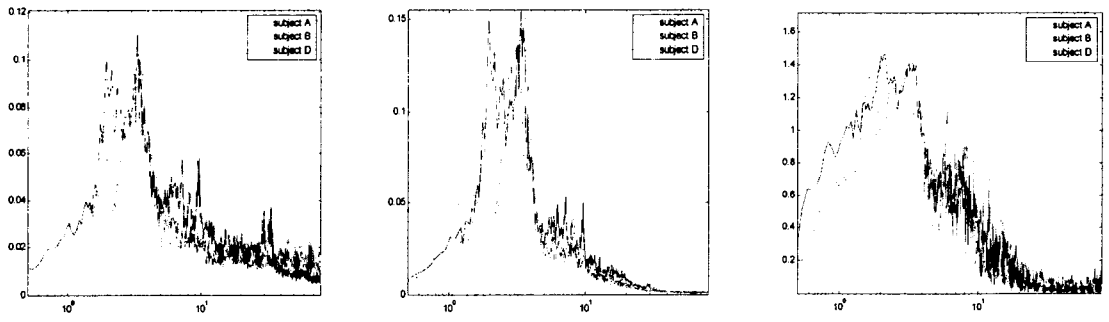
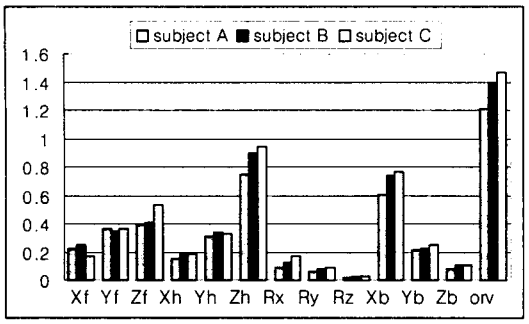
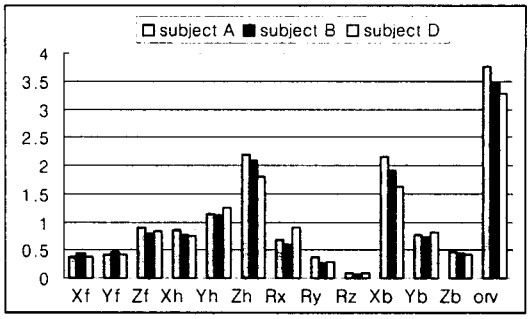


Fig. 6 Power Spectral density of (a)Foot Z,(b)Hip Z and (c)Transfer Function



(a) road A



(b) Road B

Fig. 7 Component Ride Value and Overall Ride Value in road A and B

라. 의자지수의 분석 결과

시트의 진동 감쇄 성능을 나타내는 의자지수는 포장도로에서는 0.738 농로에서는 0.964 그리고 작업시에는 0.392 로 측정되었다. 의자지수가 크게 나타난 농로에서 바닥과 시트아래 수직방향 가속도 사이의 전달함수와 시트 아래와 시트 위의 전달함수를 살펴보면 Fig. 8 과 같다. 그림을 살펴보면 서스펜션에 의한 진동 감쇄가 5hz 이하의 진동에 대해서는 좋은 성능을 보이고 있지 못함을 알 수 있다. 또한 쿠션에 의한 감쇄는 3-4hz 사이에서 좋지 못한 결과를 보이고 있다. 따라서 서스펜션에 의한 진동 감쇄가 약 3hz 이상에서 잘 일어나게

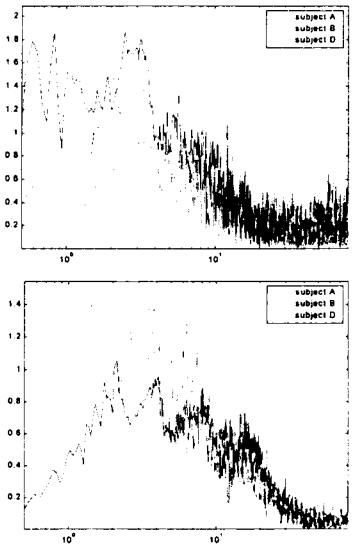


Fig. 8 Transfer function between (a)floor & below cushion (b)below cushion & above cushion

된다면 전체 시트의 진동 감쇄 성능을 향상시킬 수 있다는 것을 알 수 있다.

마. 건강에 미치는 영향에 대한 고찰

진동이 건강에 미치는 영향은 주로 척추에 대한 영향을 보고 있고 따라서 엉덩이에 전달되는 세 방향의 진동을 이용하여 평가하게 된다. 엉덩이의 세 방향 병진 가속도를 주파수 가중함수와 축 가중계수를 이용하여 조정된 가속도 이승근 값을 구해보면 포장도로의 경우 1.01m/s2 ±0.097, 농로의 경우 2.84m/s2 ±0.127 그리고 작업시 1.23m/s2 의 결과가 나온다. 계산된 결과는 국제규격(ISO)에 의해 포장도로에서는 대략 1-2시간, 농로에서는 대략 몇분-40분 그리고 작업시에는 10-60분 정도 지속적으로 진동을 받으면 건강에 영향을 미칠 수 있다고 말할 수 있다.

4. 결론

본 논문에서는 12축 인체 진동 측정 장치를 이용하여 농업용 트랙터에서 사람이 느끼는 승차감을 요소 승차감 지수, 전체 승차감 지수 그리고 의자 지수를 이용하여 평가해 보았다. 또한 트랙터의 작업 상황에서 인체에 전달되는 진동에 의해 건강에 영향을 받을 수 있을 작업 시간을 구해 보았다. 그 결과 대상으로 한 트랙터는 사람에게 아주 불편한 정도의 진동을 전달하고

있으며 1-2 시간 이상 사용할 경우 건강에 악영향을 미칠 수 있음을 알 수 있었다.

또한 진동 특성을 살펴본 결과 인체에 전달되는 수직 방향 진동은 1-10hz 사이에 크게 나타나고 특히 3-5hz 사이에서 크게 나타나고 있음을 볼 수 있었다. 그러나 시트의 서스펜션 부분은 약 5-10hz 이상의 진동에는 좋은 성능을 보이지만 그 이하 주파수의 진동의 감쇄에는 좋은 효과를 나타내고 있지 못함을 볼 수 있었다. 그리고 농로를 이동하는 경우와 같이 아주 울퉁불퉁한 곳을 이동할 경우 좌우 방향의 진동을 감쇄시키지 못하고 있어 큰 불편함을 주고 있다. 따라서 농업용 서스펜션 시트의 설계시 3-5hz 정도의 진동을 크게 감쇄할 수 있도록 하는 등의 연구가 요구되고 있다.

5. 참고문헌

1. M.Griffin, 1990, Handbook of Human Vibration, Academic Press, London

2. British Standards, BS 6841, "Measurement and Evaluation of Human Exposed to Whole-body Mechanical Vibration and Repeated Shock", 1987

3. International Organization for Standardization(ISO) 2631-1:1997, "Mechanical Vibration and Shock - Evaluation of Human Exposure to Whole-body Vibration", 1997

4. 조영건, 윤용산, "승용차에서의 인체진동 측정 및 시트 특성 최적 설계", 대한기계학회논문집A권, 제23권 제7호, pp.1155-1163, 1999