

# 農用 트랙터의 乘車振動 평가에 관한 연구(Ⅲ)

— 승차진동의 측정과 평가 —

## Evaluation of Ride Vibration of Agricultural Tractors(Ⅲ)

— Measurement and Evaluation of Ride Vibrations —

鄭守植\*\*

S. S. Chung

金景旭\*

K. U. Kim

文啓松\*\*

G. S. Moon

### Summary

Vertical and horizontal ride vibrations of the selected agricultural tractors were measured and evaluated with respect to the ISO 2631 'guide for the evaluation of human exposure to whole body vibration'.

Evaluation showed that at the normal transportation speeds of 1.4~20km/h on both the concrete and ground surfaces tractor drivers were exposed to the vibrations whose magnitudes exceed the 8 hour fatigue decreased proficiency boundary in the frequency ranges of 2~16Hz in vertical and 1~2Hz in horizontal directions. Considering that tractor operation becomes as one of the specialized job for the future farming in Korea, measures must be made to protect the drivers against harmful ride vibrations of agricultural tractors.

#### 1. 서 론

인체가 민감하게 반응하는 승차진동은 주로 트랙터가 불규칙한 노면을 주행할 때 노면으로부터 야기되는 저주파 진동이다. 기능상 트랙터에는 저주파 진동을 차단하기 위한 車輪 懸架 裝置를 설치할 수 없기 때문에 이러한 저주파 진동은 대부분 운전자에게 직접 전달되고 있다. 트랙터의 승차진동은 운전자의 작업 능률뿐만 아니라 장기적으로는 신체 異常의 원인이 된다. 따라서, 운전자가 과도한 승차진동 특히, 저주파 진동에 노출되지 않도록 승차진동을 차단시키거

나 또는 감소시키기 위한 대책이 필요하다.

본 연구는 현재 국내에서 사용되고 있는 농용 트랙터의 승차진동을 측정하여 그 수준을 평가한 것이다. 국내의 영농 형태가 점차 대규모 전업농 혹은 기계화 영농단, 영농 회사 등 공동 이용 조직을 이용한 대리 영농 형태로 발전함에 따라 트랙터도 점차 대형화, 고속화되고 있으며, 운전자도 영농 회사 또는 공동 이용 조직에 소속된 직업인으로 전문화되고 있다. 트랙터 운전자가 직업인으로 전문화되어 장기간 트랙터를 운전할 경우, 승차진동은 심각한 직업병의 원인이 될 수 있기 때문에 이에 대한 대책을 강구하지

\* 서울대학교 농업생명과학대학

\*\* 현대정공 기술연구소

않으면 안된다.

## 2. 연구사

Huang 와 Suggs(1967)는 디스크 플라우와 물 드보드 플라우 경운에서 트랙터의 승차진동을 측정, 분석하여, 수평과 수직 방향의 승차진동은 각각 작업 속도가 증가함에 따라 증가한다고 하였다. Bjerninger(1966)도 각종 도로 조건에서, 트랙터의 승차진동을 측정하여 승차진동의 크기는 주행 속도에 비례하여 증가하며, 증가 폭은 노면 상태에 따라서 다르다고 하였다. 트랙터를 운전할 때 편안함을 느낄 수 있는 승차진동의 주파수 범위는 대형 트랙터에서보다는 소형 트랙터에서 넓다고 하였다. 또한, 그는 타이어의 공기압이 승차진동에 미치는 영향은 아스팔트 노면에서보다는 비포장 노면에서 크고, 승차진동의 크기는 수평 방향보다는 수직 방향에서 크다고 하였다. Matthews(1972)는 트랙터 운전자에 대한 설문 조사를 통하여 대부분의 트랙터 운전자는 최고 속도에서 진동으로 인한 불쾌감을 느끼며 운전 능력이 감소되기 때문에 최대 속력의 2/3 이하 수준에서 트랙터를 운전한다고 보고한 바 있다. Walters(1976)는 각종 경운 조건과 노면 조건에서 측정된 135마력 트랙터에 대한 승차진동을 분석하여, 그 수준이 ISO 2631의 안전 및 건강을 기준으로 한 노출한계(expose limit)보다는 낮았으나, 작업 성능을 기준으로 한 8시간 내피로한계(fatigue-decreased proficiency boundary)보다는 높았다고 하였다. 선진국에서는 많은 연구를 통하여 농업용 트랙터에 대한 승차진동의 수준을 평가하고 이에 대한 안전 대책을 강구하고 있으나, 아직 국내에서는 트랙터의 승차진동 수준에 대한 연구 보고가 없다.

본 연구의 제1보(정 등, 1992)와 제2보(정 등, 1992)에서는 각각 승차진동의 평가 기준과 승차진동을 측정하고 분석할 수 있는 계측 시스템을 연구하여 그 결과를 발표한 바 있다.

## 3. 승차진동의 측정

### 가. 승차진동 측정 시스템의 설치

본 연구의 제2보(정 등, 1992)에서 발표한 승차진동 측정 시스템을 세 부분으로 나누어 트랙터에 설치하였다. 첫번째 부분은 측정 시스템을 조종하는 부분으로서 신호 조정기, PCL-812PG 인터페이스 카드(A/D 변환), 축전지, 노트북 컴퓨터로 구성되어 있다. 이 부분은 운전자가 직접 조작할 수 있도록 운전자의 전방 트랙터 후드(hood)에 설치하였다. 각 장치를 적절한 크기의 상자에 넣어 일체로 고정한 후 트랙터 후드에서 상자가 떨어지지 않도록 고무줄로 단단히 고정하였으며, 트랙터 엔진에서 발생하는 진동을 차단하기 위하여 상자의 밑부분을 완충재로 채웠다. 두번째 부분은 측정 시스템의 전원으로 사용되는 DC-AC 전력 변환기로서, 변환기의 작동 상태를 항상 파악할 수 있도록 운전자 옆에 설치하였다. 입력 전원의 케이블은 축전지로부터 충분한 거리를 확보할 수 있도록 4m 정도로 하였다. 세번째 부분은 승차진동을 직접 감지하는 좌형 진동계로서, 운전자가 깔고 앉을 수 있도록 의자의 정중앙에 설치하였으며, 주행 중 좌형 진동계의 방향이 바뀌지 않도록 접착 테이프프로세서의자에 고정하였다. Fig. 1은 실험 트랙터에 설치된 측정 장치를 나타낸 것이다.

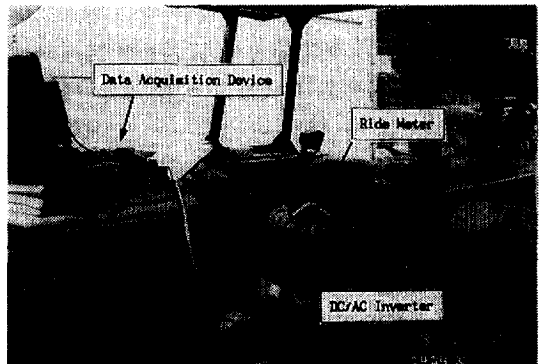


Fig. 1 A tractor equipped with the data acquisition system.

#### 나. 인공 주행로

승차진동은 국립농업자재검사소에 있는 인공 주행로에서 측정하였다. 인공 주행로는 타원형 트랙으로서 길이가 400m이고, 콘크리트 노면과 비포장 노면으로 구분되어 있다. 콘크리트 노면에는 5m 간격으로 3cm 높이의 요철이 설치되어 있고, 비포장 노면에는 약 50m 간격으로 10cm 높이의 장애물이 설치되어 있으며 흙과 자갈이 산재해 있다.

#### 다. 실험 트랙터

측정 대상 트랙터는 농업자재검사소에 검사를 신청한 트랙터 중에서 임의로 선정한 7개 모델 F415D-α, F455D-α, GT390D, 55-66DW, 80-66DW, L3503-4WD, TL3840-P이었으며, 실제 농작업에는 한 번도 사용하지 않은 트랙터였다. 트랙터의 출력 범위는 35~80마력이었으며, 50마력 이상은 수입 트랙터에 해당하였다. 구조적인 특징으로는 모두 4륜 구동형으로 안전 프레임울 장착하였다. 그러나 본 연구는 국내에서 사용되고 있는 트랙터의 대체적인 승차진동의 수준을 평가하기 위한 것이었기 때문에 구조적인 특성이나 출력 수준에 따라 트랙터를 구분하지 않고 승차진동을 측정하였다.

#### 라. 측정 방법

승차진동은 작업기 또는 트레일러를 부착하지 않고 2륜 구동 상태에서 측정하였다. 운전자의 자세는 보통 트랙터를 운전할 때와 같은 자세를 취하도록 하였다. 즉, 양손은 조향 핸들을 잡고 양발은 트랙터의 플랫폼을 가볍게 밟은 상태에서, 등을 좌석 등받이에 밀착하여 정면을 주시하는 자세를 취하도록 하였다. 주행 속도는 주행로에 따라 콘크리트 노면에서는 실험 트랙터의 최고 속력을 3 등분하여 高, 中, 低速의 3수준으로 구분하고, 비포장 노면에서는 최고 작업 속도를 3 등분하여 高, 中, 저속의 3수준으로 하였다.

데이터 수집 장치에서 아날로그 데이터를 수치화할 때 샘플링 간격은 1/8000초로 하였으며,

입력할 총 데이터 수는  $32,760 \times N$ 으로 하여, N을 1~5 중에서 조정할 수 있도록 하였다. N을 5로 하였을 때 총 데이터 수는 163,750이고 데이터 수집 시간은 20.5초이었다. 데이터 입력은 주행 속도가 안정되었을 때 키보드에서 노트북 컴퓨터에 입력 신호를 보내어 시작하고, 데이터 저장은 키를 작동시킬 때 발생하는 노이즈를 제거하기 위하여 키가 작동된 후 2.5초가 지난 때부터 시작하도록 하였다. 측정은 한 속도 수준에서 세 번씩 반복하여 실시하였다. Fig. 2는 승차진동을 측정하는 모습을 나타낸 것이다.



Fig. 2 A view of ride vibration measurement.

#### 4. 승차진동의 분석

측정한 승차진동은 본 연구에서 개발한 데이터 분석 프로그램을 이용하여 분석하였다. 먼저, 한 속도 수준에서 3번씩 측정하여 기록한 승차진동을 시간 함수로 표시하여 그 중에서 가장 명확하고 데이터의 단절과 異常이 없는 기록을 분석 대상으로 선정하였다. 선정한 시간 함수의 데이터를 다시 정밀하게 檢査하여 분석할 데이터 영역을 결정하고, 이 영역의 데이터를 파일에 저장하였다. 분석 영역으로 결정된 시간 함수의 데이터는 다음과 같은 방법으로 분석하였다.

1) 시간 함수의 데이터를 A/D 변환기로 수치화한다. PCL-812PG 인터페이스 카드의 디지털 값과 전압간의 선형 관계를 이용하여 A/D 변환

치를 전압 단위로 변환하고, 이를 다시 가속도 변환기의 측도 설정식을 이용하여 가속도 값으로 변환한다.

2) 가속도 데이터는 바이어스를 제거하기 위하여 평균이 0이 되도록 변환한다.

3) FFT 계산에서는 스펙트럼의 누출을 감소시키기 위하여 FFT를 실행하기 전에 각각 총 데이터 수의 1/10에 해당하는 초기와 마지막 부분의 데이터를 코사인 테이퍼링 방법으로 테이퍼링한다.

4) 시계열 가속도 데이터를 Cooley-Tukey 알고리즘을 채택한 고속 푸리에 변환 프로그램을 이용하여 주파수 영역 데이터로 변환한다.

5) 주파수 스펙트럼을 1/3 옥타브 중심 주파수의 rms 가속도로 변환한 후 각 중심 주파수의 rms 가속도에 ISO 2631의 수직 및 수평 방향의 진동 주파수 가중치를 곱한다.

6) 1~80Hz 주파수 대역에서 1/3 옥타브 중심 주파수에 대한 rms 가속도를 승차진동의 수준으로 출력한다.

7) 승차진동의 수준은 ISO 2631의 4시간과 8시간 내피로한계와 비교한다.

### 5. 분석 결과의 고찰

측정한 승차진동은 현재 국내에서 사용되고 있는 트랙터의 평균적인 승차진동의 수준을 규명하기 위하여 ISO 2631의 내피로한계를 기준으로 평가하였으며, 트랙터의 상대적인 비교나 구조상의 특징 혹은 출력의 차이로 인한 진동 수준의 변화를 분석 대상으로는 하지 않았다. 상대적인 비교 분석은 트랙터의 승차진동을 평가하는 데는 적합하지 않기 때문이다.

실험 트랙터에서 측정한 수직 방향의 승차진동은 2~8Hz의 주파수 범위에서, 수평 방향은 2 Hz 이하의 범위에서 대부분 'ISO 2631 전신 진동 노출 기준'의 8시간 내피로한계 수준을 초과하였다. 이러한 결과는 트랙터 운전자의 대부분이 작업 능률을 고려한 한계 진동 수준 이상의 진동에 노출되고 있다는 것을 나타낸 것이다. 수

직 진동에서 4~8Hz와 수평 진동에서 2Hz 이하의 주파수 영역은 인체가 가장 민감한 영역이기 때문에 승차진동의 수준을 특별히 낮추어야 할 주파수 영역이다. 각 노면 상태와 주행 속도에서 승차진동의 수준은 다음과 같다.

#### 가. 콘크리트 노면에서 수직 방향의 승차진동

콘크리트 노면에서 수직 방향의 승차진동의 수준은 Fig. 3~Fig. 5에서와 같다. 저속 범위(1.40~1.87km/h)에서 승차진동의 주파수 영역은 1~25Hz이고 최대 진동 수준은 4Hz에서 1.0~3.8m/s<sup>2</sup>이었다. 2.5~8Hz의 주파수 범위에서 측정 트랙터의 승차진동 수준은 ISO 2631의 4시간과 8시간 내피로한계를 모두 초과하였다. 중속 범위(6.3~10.4km/h)에서는 주파수 영역이 1~30Hz이고, 최대 진동 수준은 3~4Hz에서 4~10m/s<sup>2</sup>으로 나타났다. 2.5~12.5Hz 범위에서 진동 수준은 ISO 2631의 4시간과 8시간 내피로한계를 모두 초과하였다. 측정 트랙터간 진동 수준의 차이가 가장 큰 주파수 범위는 5~31.5Hz로 나타났다. 고속(17.9~27.9km/h)에서 최대 진동 수준은 3~5Hz 범위에서 10~14m/s<sup>2</sup>이었고, 2~16 Hz에서는 ISO 2631의 4시간과 8시간 내피로한계를 초과하였다.

콘크리트 노면에서 수직 방향의 승차진동은 주행 속도에 관계없이 모두 4~8Hz의 주파수 범위에서 노출한계 진동 수준을 초과하였다. 일

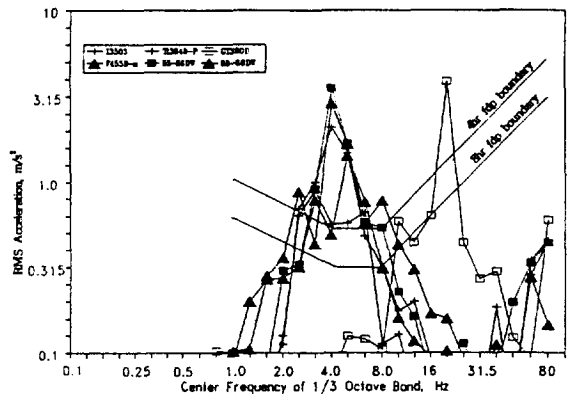


Fig. 3 Vertical ride vibration on concrete surface at speed range of 1.40~1.87km/h.

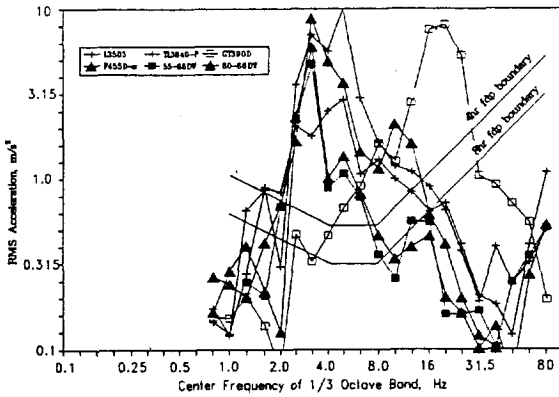


Fig. 4 Vertical ride vibration on concrete surface at speed range of 6.30~10.40km/h.

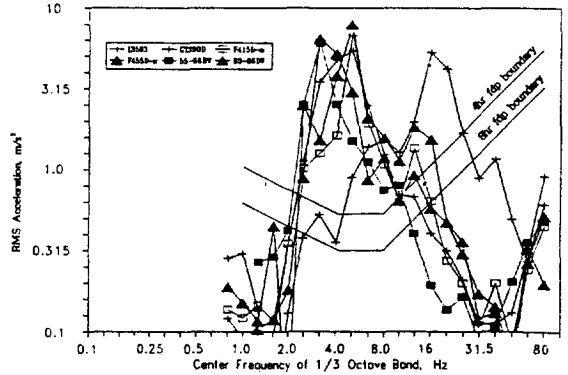


Fig. 6 Vertical ride vibration on ground surface at speed range of 1.40~1.87km/h.

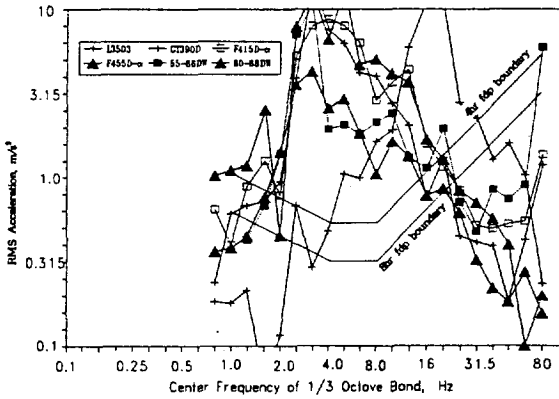


Fig. 5 Vertical ride vibration on concrete surface at speed range of 17.89~27.90km/h.

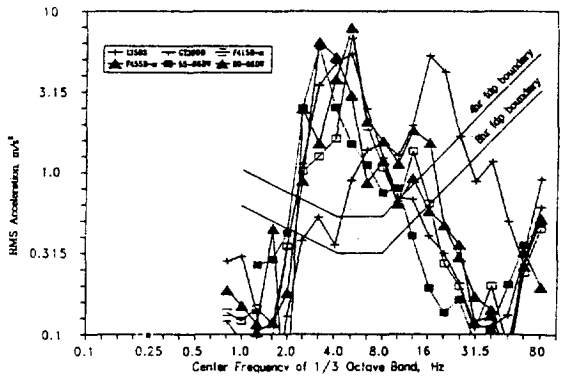


Fig. 7 Vertical ride vibration on ground surface at speed range of 2.16~7.20km/h.

반적으로 주행 속도가 증가하면 진동 수준도 증가하였으나, 주파수 영역은 유사하였다.

나. 비포장 노면에서 수직 방향의 승차진동

비포장 노면에서 수직 방향의 승차진동의 수준은 Fig. 6~Fig. 8에서와 같다. 주파수 범위는 1.0~25Hz이고, 크기는 콘크리트 노면에서와 같은 경향으로 나타났다.

저속(1.40~1.78km/h) 범위에서 최대 진동 수준은 4Hz에서 1.6~4.0m/s<sup>2</sup>이었고, 2.5~8.0Hz 영역에서는 ISO 2631의 4시간과 8시간 내피로 한계를 모두 초과하였다. 중속(2.16~7.20km/h)에서 최대 진동은 2.5~10Hz 범위에서 5.2~7.0

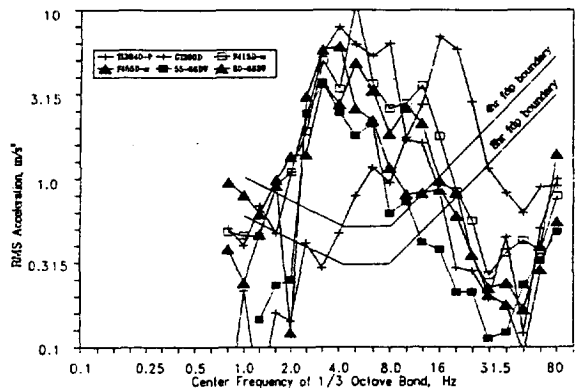


Fig. 8 Vertical ride vibration on ground surface at speed range of 9.83~14.62km/h.

m/s<sup>2</sup>로 나타났으며 2.5~10Hz 범위에서 ISO 2631의 4시간과 8시간 내피로한계를 모두 초과하였다. 고속(9.8~14.6km/h)일 때의 진동 수준은

저속과 중속에서와 같은 피크는 나타나지 않았으나, 2.5~5Hz 주파수 영역에서 최대 진동 수준은 6~8m/s<sup>2</sup>이었다. 고속에서 ISO 2631의 4시간과 8시간 내피로한계를 초과하는 승차진동의 주파수 범위는 2.5~16Hz이었다.

다. 콘크리트 노면에서 수평 방향의 승차진동

콘크리트 노면에서 수평 방향의 승차진동의 수준은 Fig. 9~Fig. 11에서와 같다. Fig. 9~Fig. 11에서 보는 바와 같이 수평 방향의 승차진동은 대부분 1~2Hz의 저주파수 영역에서 내피로한계를 초과하였다.

저속(1.4~1.87km/h)일 때, 최대 진동 수준은 1.6Hz에서 0.34m/s<sup>2</sup>이었고 ISO 2631의 8시간 내피로한계를 초과하였다. 중속(6.3~10.4km/h)에서 최대 진동 수준은 1.25~2.5Hz 범위에서 0.35~0.6m/s<sup>2</sup> 정도이었다. 이 수준은 1~2Hz 범위에서 ISO 2631의 4시간과 8시간 내피로한계를 모두 초과하는 수준이다. 고속(17.9~20.9km/h)에서는 1~3.15 Hz에서 ISO 2631의 4시간과 8시간 내피로한계를 초과하였다. 고속에서는 저속과 중속의 경우보다 승차진동의 크기가 증가하였고 1.6~2.0Hz에서 최대 진동 수준은 0.8~3m/s<sup>2</sup>이었다.

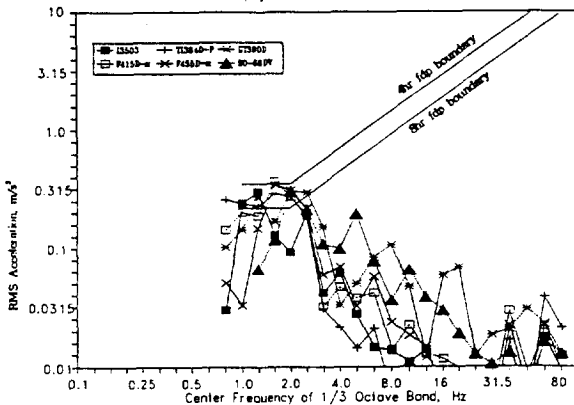


Fig. 9 Transverse ride vibration on concrete surface at speed range of 1.40~1.87km/h.

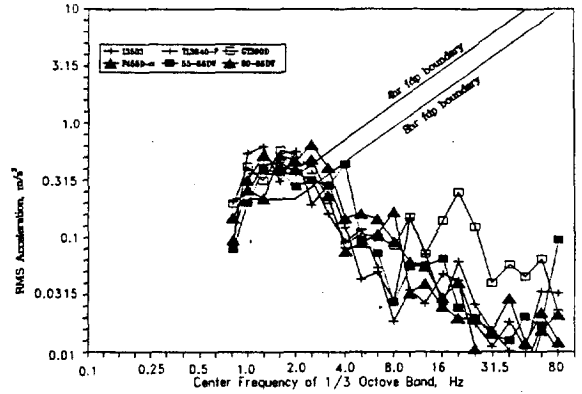


Fig. 10 Transverse ride vibration on concrete surface at speed range of 6.30~10.40 km/h.

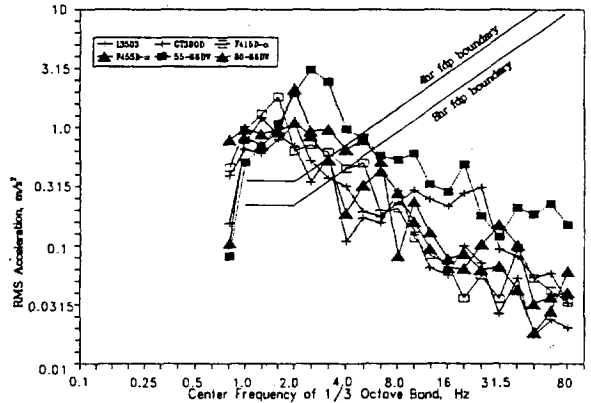


Fig. 11 Transverse ride vibration on concrete surface at speed range of 17.89~27.90 km/h.

라. 비포장 노면에서 수평 방향의 승차진동

비포장 노면에서 수평 방향의 승차진동은 콘크리트 노면에서와 같은 주파수 특성을 보였으나 크기는 5~10% 증가하였고 특히, 63Hz 이상의 주파수 영역에서는 콘크리트 노면에서보다 크게 증가하였다.

저속(1.4~1.87km/h)일 때 승차진동의 수준은 트랙터에 따라 차이가 있으나 1.2~2.0Hz 영역에서 0.2~0.25m/s<sup>2</sup>이었으며 ISO 2631의 4시간과 8시간 내피로한계는 초과하지 않았다. 중속(2.16~7.2km/h)에서 진동 수준은 2.0~8.0Hz에서 0.063~0.5m/s<sup>2</sup> 정도이었다. 1~3.5Hz 범위에서

서 진동 수준은 ISO 2631의 8시간 내피로한계를 초과하였으나, 4시간 내피로한계는 초과하지 않았다. 고속(9.8~14.6km/h)에서 최대 진동 수준

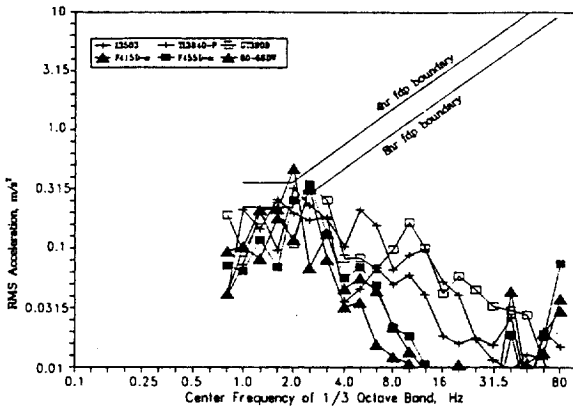


Fig. 12 Transverse ride vibration on ground surface at speed range of 1.40~1.87km/h.

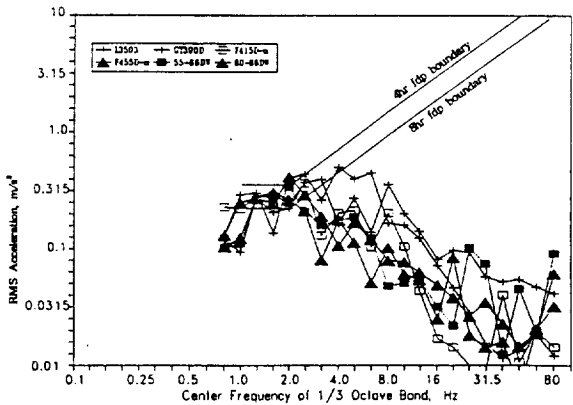


Fig. 13 Transverse ride vibration on ground surface at speed range of 2.16~2.80km/h.

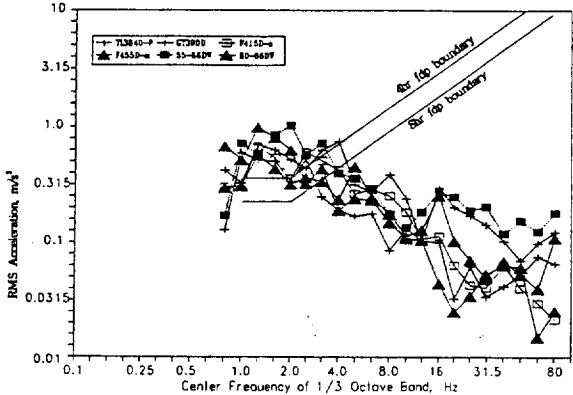


Fig. 14 Transverse ride vibration on ground surface at speed range of 9.38~14.62km/h.

은  $1.0m/s^2$  이었으며,  $1.0\sim 2.5Hz$  범위에서는 4시간,  $1.0\sim 3.15Hz$ 에서는 8시간 내피로한계를 초과하였다. 비포장 노면에서 수평 방향의 승차진동의 수준은 Fig. 13~Fig. 15에서와 같다.

### 6. 요약 및 결론

본 연구는 현재 국내에서 사용되고 있는 35~80 마력급 농용 트랙터중에서 임의로 선정한 8대를 대상으로 주행 속도가  $1.4\sim 28km/h$  범위일 때 콘크리트 노면과 비포장 노면에서 각각 수직 방향과 수평 방향의 승차진동을 측정하여 분석하고, 이를 ISO 2631 '전신 진동 노출 기준'과 비교 평가하였다.

측정 트랙터의 승차진동의 수준은 수직 방향의 경우 주행 속도가  $1.40\sim 1.87km/h$ 일 때  $2\sim 8Hz$ ,  $2.16\sim 28km/h$ 일 때  $2\sim 16Hz$  범위에서 ISO 2631 8시간 내피로한계를 초과하였으며, 수평 방향의 경우  $2.16\sim 28km/h$ 일 때  $1\sim 2Hz$ 에서 8시간 내피로한계를 초과하였다. 최대 진동 수준은 수직 방향의 경우  $3\sim 5Hz$ 에서  $3.8\sim 14m/s^2$  이었고, 수평 방향의 경우  $1\sim 3Hz$ 에서  $0.34\sim 3m/s^2$  이었다. 노면에 따른 승차진동의 수준은 같은 주파수 범위에서 비포장 노면의 수준이 콘크리트 노면에서보다  $5\sim 10\%$  증가하였으며, 주행 속도가 빠를 수록 진동 수준은 증가하였으나 주파수 영역의 변화는 크지 않았다. 이는 속도 증가로 인한 고주파 성분이 트랙터의 타이어나 본체에 의하여 감쇄되었기 때문으로 판단된다.

본 연구에서 주행 노면은 일반적인 트랙터의 작업 환경보다도 우수하기 때문에 실제 농로 주행 혹은 농작업에서 승차진동의 수준은 본 연구에서 분석된 수준보다도 높을 것으로 예상된다. 또, 제한된 숫자의 실험 결과로부터 전체 트랙터에 대한 평가를 정확히 도출하기는 어려우나, 실험 트랙터가 국내에서 보편적으로 사용되고 있는 모델이고, 특별히 승차진동을 감쇄시키기 위한 장치를 채택하고 있지 않기 때문에 국내에서 사용되고 있는 트랙터의 평균적인 승차진동의 수준이 본 연구에서 분석한 수준보다 낮을 것이라고 판단하기는 어렵다.

앞으로, 트랙터 운전이 전문 직업으로 발전될 것을 예상하여, 국내 트랙터에 대한 정밀한 승차진동의 평가와 운전석 현가 장치의 개선, 차체의 구조 개선 등 과도한 승차진동으로부터 운전자를 보호할 수 있는 안전 대책을 강구하여야 할 것으로 판단된다.

### 참 고 문 헌

1. 정수식, 문계송, 김경욱. 1992. 농용 트랙터의 승차진동 평가에 관한 연구(I). -승차진동의 평가 기준에 관한 고찰-. 한국농업기계학회지 17(4) : 314~325.
2. 정수식, 문계송, 김경욱. 1992. 농용 트랙터의 승차진동 평가에 관한 연구(II). -승차진동 측정 및 분석 시스템의 개발-. 한국농업기계학회지 17(4) : 326~335.
3. Bjerninger, S. 1966. Vibrations of tractor driver. Royal Swedish Academy of Sciences. Acta Polytechnica Scandinavica. Mechanical Engineering Seires. No.23. pp. 122
4. Huang, B. K. and C. W. Suggs. 1967. Vibration studies of tractor operations. Transactions of the ASAE 10(4) : 478~482.
5. International Organization for Standardization. 1985. Guide for the evaluation of human exposure to whole-body vibration (ISO 2631 /1), Geneva, ISO.
6. International Organization for Standardization. 1990. Human response to vibration measuring instrumentation (ISO 8041) Geneva, ISO.
7. Mattews, J. 1972. The Ergonomics of tractor design and operation. Proceedings of the XVI CIOSTA Congress. Wageningen, The Netherlands.
8. Stikeleather, L. F. 1976. Review of ride vibration of standards and tolerance criteria. Transactions of the SAE 82 : 1460~1467.
9. Walters, F. C. 1976. Ride vibration standards and human tolerance criteria. ASAE paper 76 - 1578.