

# 농용 트랙터의 乘車 振動 평가에 관한 연구(I)

— 승차 진동의 평가 기준에 관한 고찰 —

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

— A Review of Ride Quality Evaluation Criteria —

鄭守植\*

文啓松\*\*

金景旭\*

S. S. Chung

G. S. Moon

K. U. Kim

### Summary

This paper reviews some relevant criteria for the evaluation of ride quality of agricultural tractors. Although there still exist many deficiencies and shortcomings, ISO 2631 'Guide for the evaluation of human exposure to whole body vibration' may be the most pertinent criterion to the ride quality evaluation of tractors. The effects of ride vibrations on the human health and performance were also reviewed and summarized in general terms.

### 1. 緒論

최근, 우리 나라의 농업 구조는 營農 會社의 설립, 기계화 영농단과 전업농의 육성 등 영농 규모가 확대되는 방향으로 개선되고 있다. 영농 규모가 확대됨에 따라 각종 농업 기계도 그 성능과 構造의 대형화가 요구되고 있으며, 이러한 傾向은 특히 농용 트랙터에서 顯著하게 나타나고 있다.

농업 기계의 성능과 구조가 대형화되면 이를 사용하는 기술도 機種에 따라 점차 專門化될 것으로 보이며, 앞으로 농업 기계의 운전도 하나의 전문 기능으로서 인식되어야 할 것이다. 운전의 전문화는 기계를 효율적으로 활용하고 관리할 수 있는 반면에, 운전자는 장기적으로 기계의 진동, 소음 등 여러 가지 유해한 작업 환경에 露出

되어야 한다. 특히, 심한 진동과 소음 등에 노출되기 쉬운 트랙터 운전자의 경우에는 장기간 트랙터를 운전함으로써 惹起될 수 있는 안전 문제를 검토하고 이에 대한 대책을 강구하여야 한다.

트랙터 운전자에 대한 안전은 크게 진동, 소음, 먼지에 의한 신체의 損傷 대책으로 구분할 수 있다. 소음과 먼지에 의한 손상은 안전 캡을 사용하여 어느 정도 예방할 수 있으나, 진동에 의한 손상은 트랙터의 기능상 차륜에 懸架 裝置를 설치할 수 없기 때문에 특별한 대책이 요구된다. 특히, 고속 작업에서 트랙터의 진동에 장기간 노출되었을 때의 신체 異常, 작업 능력의 低下 등은 이미 많은 文獻을 통하여 문제점으로 지적된 바 있다(Rossegger, 1960, Gruber and Ziperman, 1974, Lewis and Griffin, 1979). 선진 농업국에서는 트랙터 운전자에 대한 승차 진동의 안전

\* 서울대학교 농업생명과학대학

\*\*현대정공 기술연구소

수준을 究明하기 위하여 많은 연구를 수행하여 왔으나(Matthews, 1972, Gierke, 1975) 아직, 우리 나라에서는 국내에서 생산되고 있는 트랙터에 대한 승차 진동의 수준과 그 대책이 보고된 바 없다.

본 연구는 농용 트랙터가 大型化, 高速化되고, 트랙터 운전이 專門化되었을 때, 심각하게 대두 될 것으로 예상되는 운전자의 진동 노출 문제를 제기하고 이에 대한 대책을 강구하기 위하여 시도되었다. 이 연구의 첫 과제로서 본 논문에서는 인체 진동의 개념과 승차 진동이 운전자에게 미치는 영향을 문헌으로 조사하고, 승차 진동의 수준을 평가할 수 있는 여러 가지 기준을 고찰하였다.

## 2. 人體 振動

### 가. 인체 진동의 종류

인체 진동은 진동에 노출된 인체의 部位에 따라 全身 振動(whole body vibration)과 局所 振動으로 구별할 수 있다. 전신 진동은 신체의 전부가 진동에 노출된 경우를 말하며, 音波 혹은 水中波에 전신이 노출되었을 때와 같다. 트랙터, 重裝備 등 차량의 운전자가 받는 진동은 발 혹은 둔부를 통하여 전신으로 전달되는 진동으로서, 전신 진동으로 보는 것이 일반적이다.

국소 진동은 신체의 일부가 진동에 노출된 상태이다. 전기 톱, 착암기 등 手持 動力 工具를 통하여 작업자의 손으로 전달된 진동과, 미스트, 더스트 등 背負式 동력 방제기를 통하여 등으로 전달된 진동은 국소 진동에 해당한다.

### 나. 인체 진동의 특성

인체가 진동에 노출되었을 때, 인체 진동의 특성은 일반적으로 진동의 크기, 주파수, 방향, 진동 노출 시간으로 나타낼 수 있다.

#### (1) 진동의 크기

진동의 크기는 일반적으로 가속도로써 표시하며, 이를 나타내는 데는 피크-피크값, RMS(root

mean square), PSD(power spectral density) 등이 있다. 피크-피크값은 크기의 변화폭을 나타내는 데 적합하다. RMS는 진동의 크기를 나타내는 가장 일반적인 방법으로서 다음과 같이 구한다.

$$RMS = \sqrt{\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x^2(t) dt}$$

여기서 T=진동 노출 시간

x(t)=시간 함수로 표시된 진동의 크기

PSD는 주파수의 변화에 따라 진동의 크기를 나타내는 데 적합하며 다음과 같이 정의된다.

$$PSD = \lim_{\Delta f \rightarrow 0} \frac{1}{(\Delta f)} \left[ \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x^2(t, f, \Delta f) dt \right]$$

여기서 f, Δf는 주파수 범위 f~f+Δf를 나타낸다. 즉, PSD는 시간 함수로 주어진 진동의 크기를 특정 주파수 대역 f~f+Δf의 성분으로 분해하였을 때 그 크기의 평균 제곱을 주파수 대역으로 나눈 것이다.

#### (2) 진동의 주파수

인체 진동에서 중요한 주파수 帶域은 대체로 3개 주파수 대역으로 구분할 수 있다. 0.01-1Hz의 超低周波, 1-100Hz의 저주파, 100Hz 이상의 고주파 대역이다. 초저주파 진동은 배나 쿠션이 좋은 버스, 고속 도로의 승용차 등을 탑승할 때 노출되는 진동의 주파수로서, 현기증, 구토 등을 일으키는 멀미(motion sickness)의 주원인으로 알려지고 있다. 인체 진동에서 문제가 되는 주파수는 주로 1-100Hz의 저주파이다. 이 중에서 1-40Hz의 저주파수 대역은 대부분 身體 器官의 固有 振動數와 일치하는 영역으로서 인체에 큰 영향을 미친다. 특히, 5-8Hz 영역에서는 臟器, 13-16Hz에서는 聲帶, 25-30Hz에서는 眼球가 共振하는 것으로 알려지고 있다. 100Hz 이상의 고주파 진동은 대체로 인체에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 알려지고 있으나, 국소 진동의 관심이 되고 있다. 손 진동은 주로 20-400Hz의 진동에 민감한 것으로 알려지고 있다. 체인톱의 主주파수 성분은 120-160Hz이다(全聖鐸, 1991).

인체의 진동 분석에서 진동의 주파수는 일반적으로 1옥타브(octave) 혹은 1/3옥타브의 중심 주파수로써 나타낸다(Spear et al., 1976). 옥타브 수는 다음 식으로 정의된다.

$$\text{옥타브 수} = \log_2 \frac{f_2}{f_1}$$

이 식에서  $f_1$ 은 기준 주파수(Hz)이고,  $f_2$ 는 측정 진동의 주파수(Hz)를 나타낸다.

예를 들어, 1Hz를 기준 주파수로 하면 1옥타브의 중심 진동수는 2, 4, 8, 16, 32Hz .....가 되고 1/3옥타브의 중심 진동수는 1, 1.25, 1.6, 2, 2.5, 3.15Hz .....가 된다.

### (3) 진동의 방향

진신 진동의 경우, 진동의 방향은 그림 1에서와 같이 인체의 心臟을 원점으로 하여 발 또는 둔부로부터 머리 방향을 z축, 등에서 앞가슴 방향을 x축, 오른 쪽에서 왼쪽 방향을 y축으로 정의하고, z축 방향의 진동을 垂直 진동, x와 y축 방향의 진동을 水平 진동이라 한다.

손 진동에서는 세제 손가락뼈가 시작되는 점을 원점으로 하여 직경이 20mm인 棒을 가볍게 잡았을 경우에는 그림 2(a)에서와 같이, 지름이 100mm인 球面에 손을 가볍게 얹었을 경우에는 그림 2(b)에서와 같이 각각 x, y, z축을 정의한다.

### (4) 노출 시간

인체에 대한 진동의 영향은 그 강도뿐만 아니라 노출된 시간에 따라서도 변화된다. 따라서, 진동이 인체에 미치는 영향을 평가할 때는, 노출 상태와 노출된 시간을 고려하지 않으면 안된다.

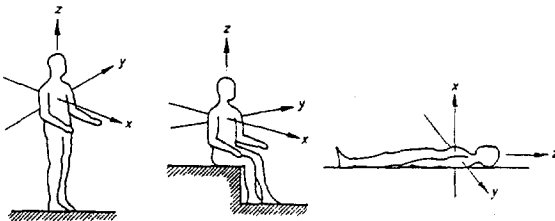
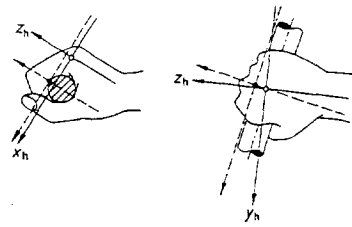
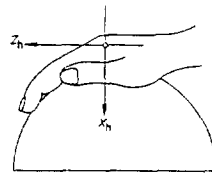


Fig. 1 Directions of basicentric coordinate systems for mechanical vibrations influencing humans.



(a) Handgrip position.



(b) Flat palm position

Fig. 2 Coordinates systems for hand vibration.

斷續的으로 진동에 노출되었을 때는 인체의 회복 과정을 고려하여야 하며, 장시간 노출되었을 때는 인체의 적응 현상을 고려하여야 한다. 예를 들면, 100dB( $a_{ref}=10^{-6} \text{ m/s}^2$ ) 정도의 진동에 30분간 노출되었을 때, 진동 감각은 1분 이내에 거의 80% 회복된다. 그러나, 현재까지의 연구 결과로서는 인체의 생리적 변수와 노출 시간 사이에 어떠한 관계가 있는지 아직 규명되지 않았다(全聖鐸, 1991).

## 3. 인체에 대한 진동의 영향

진동은 인체의 피부, 근육, 힘줄, 관절 등을 통하여 인체로 전달된다. 진동이 전달되면 그 감각은 지각 신경 경로를 통하여 한편으로는 大腦로 전달되어 과거의 기억, 학습 효과 등으로 진동이라는 것을 인식하고, 불쾌감을 유발한다. 다른 한편으로는 視床下部로 전달되어 자율 신경계를 자극하고 각종 생체 기관을 자극한다. 그 밖에 下垂體에 전달되어 생체의 호르몬 분비를 억제하기도 한다.

진동에 대한 인체의 반응은 대단히 복잡하여, 노출될 때의 심리적, 정신적, 감정적인 상태에

따라서 차이가 크다. 또, 사람에 따라서도 그 반응이 일정하지 않다.

인간이 감지할 수 있는 진동의 최소 크기는  $0.01\text{m/s}^2 \text{ rms}(80\text{dB})$  정도로 알려져 있다(Gundry, 1978). 그러나, 진동의 크기가  $50\text{dB}$ 이면 약 30%의 사람이 진동을 감지하기 시작하고, 대부분의 사람은  $75\text{dB}$  정도에서 진동을 느끼는 것으로 알려져 있다. 따라서, 겨우 느낄 수 있는 진동의 크기는 대개  $75 \pm 5\text{dB}$  정도라고 할 수 있다(全聖鐸, 1991). 이 이상의 진동에서 인간이 느끼는 진동의 강도는 그 크기에 지수적으로 비례하여 증가한다(Fothergill and Griffin, 1977, Shoenberger and Harris, 1971). 진동에 대한 지각 반응과 생리 반응을 비교하여 보면 생리 반응은  $30\text{-}50\text{dB}$  정도의 진동에서 시작되며, 지각 반응은  $0.01 \text{ m/s}^2$  혹은  $80\text{dB}$  수준에서 시작된다. 즉, 생리 반응은 지각 반응에 비하여 진동에 대한 민감도가 상당히 높다(全聖鐸, 1991).

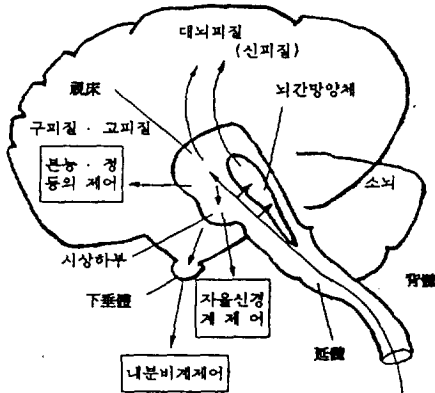


Fig. 3 Transmitted path of vibrational impluse.

진동에 대한 머리, 가슴, 복부, 다리 등 인체를 구성하는 각 부위의 지각 반응은 주파수에 따라 각각 다른 것으로 알려져 있다. 이는 진동의 주파수에 대한 인체 각 부위의 민감도가 다르다는 것을 의미하며 또, 각 부위에는 각각의 고유

진동수가 존재한다는 것을 의미한다. 따라서, 인체가 어떤 특정한 주파수의 진동에 더 민감한 것은 각 부위의 반응이 복합적으로 결합되어 나타나는 것으로 볼 수 있다. 이러한 사실을 기초로 하여, 인체를 진동 모형으로 모형화하려는 많은 연구가 시도되었다(Macduff, 1969, Grag and Ross, 1976 등). 그 결과 인체의 진동 모형은 모형의 사용 목적에 따라 자유도가 2 혹은 3인 간단한 모형에서부터 자유도가 16인 모형에 이르기까지 다양한 형태로 개발되었다. 그림 4는 자유도가 12인 인체의 진동 모형이다. 각 부위에 표시된 진동수는 고유 진동수를 나타낸 것이다(Rasmussen, 1982).

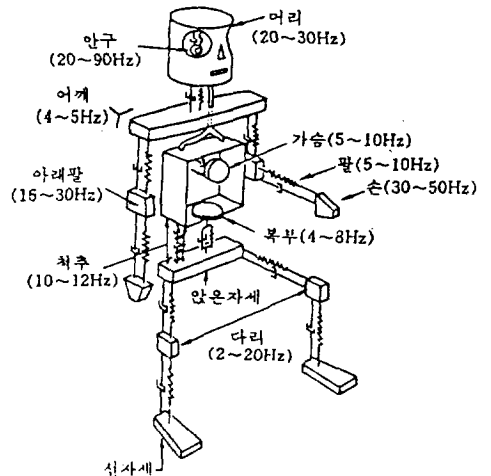


Fig. 4 Mechanical model of the human body showing resonance frequency-ranges of the various body sections.

#### 4. 승차 진동의 특성

승차 진동은 차량이 주행할 때 운전자 혹은 승객이 노출되는 진동으로서, 엔진, 트랜스미션 등 각종 振動源으로부터 인체로 전달된다. 농용 트랙터의 경우, 운전자가 받는 승차 진동은 수직 및 수평 진동뿐만 아니라 롤링(rolling), 피칭(pitching), 요잉(yawing) 등 회전 운동에 의한 진동도 있다. 이러한 진동은 트랙터 자체에서 발생하는 진동과 불규칙한 노면에서 트랙터로 전

달되는 진동 등이 복합적으로 구성된 것이다. 엔진, 트랜스미션 등 트랙터 자체에서 발생하는 진동은 주로 고주파 특성을 갖는 진동이며, 불규칙한 노면으로부터 발생하는 진동은 주로 저주파 진동에 해당한다. 이 저주파 진동은 인체에 有害한 것으로 알려지고 있으며, 저주파 진동에 대한 인체의 감각도 민감하다. 따라서, 승차 진동의 연구 대상은 주로 저주파 진동에 국한되고 있다. Matthews(1972)는 대형 트랙터 운전자의 대부분은 최고 속력에서 操作能力이 감소하고 진동으로 인한 불편감을 느끼기 때문에 보통 최대動力의 2/3 이하에서 사용한다고 조사하였다.

Suggs(1973)는 전신 진동은 4-8Hz의 주파수 영역에서 인체에 가장 민감하다고 하였다. 이 범위는 내장의 고유 주파수와 같은 범위라고 하였다. 일반적으로, 인체는 수직 진동은 4-8Hz, 수평 진동은 2Hz 이하의 주파수 영역에서 가장 민감한 것으로 알려지고 있다.

### 가. 승차 진동이 인체에 미치는 영향

#### (1) 건강의 관점에서

승차 진동은 심리적, 정신적으로 불안감을 느끼게 할 뿐만 아니라, 신경계를 자극하여 시각 및 지각 기능을 악화시키며 레이노드 현상이나, 척추 이상, 위장 장애 등 인체에 현저한 악영향을 초래하는 것으로 알려지고 있다. 또한, 승차 진동은 循環器나 泌尿器 계통에도 나쁜 영향을 준다. 그 영향은 작업중 혹은 작업 후의 피로, 두통, 멀미 등의 형태로 나타나는 경우가 많다.

Liljedahl(1979) 등은 진동에 노출된 인체는 생리적, 심리적인 영향을 받는다고 하였다. 또한, 승차 진동의 크기는 주행 속도와 밀접한 관계가 있고 일반적으로, 주행 속도가 증가할수록 승차 진동에 의한 불편감이 증가한다고 하였다.

미국의 국립직업안전건강연구소(National Institute for Occupational Safety and Health, NIOSH)에서 시외 버스, 장거리 화물 운송 트럭 및 중장비 운전자들을 대상으로 실시한 건강 조사에 의하면 시외 버스 운전자의 경우 사무직에 비하여 현저히 높은 비율의 순환기, 소화기 질환

과 요통을 경험하였으며, 그 원인으로는 작업 자세, 식사 습관, 전신 진동으로 지적되었다(Gruber, 1976). 장거리 화물 트럭 운전자의 경우도 항공 관제사와 비교하면 척추의 변형, 요통, 지질 등이 현저하게 나타났으며(Gruber and Ziperman, 1974), 중장비 운전자의 경우에는 생식기 질환, 협심증, 또는 내분비가 정상인 비만증의 발생 비율이 높은 것으로 보고되었으며, 이는 모두 전신 진동의 영향에 의한 것으로 밝혀지고 있다(Milby and Spear, 1974, Spear et al., 1976). 헬리콥터 조종사의 경우에도 빈번한 요통이 보고된 바 있으며, 이는 헬리콥터의 진동에 장기간 노출되었기 때문인 것으로 확인되었다(Seris and Auffret, 1967, Shanahan and Reading, 1984). 장거리 트럭 운전자의 경우, 디스크 질환이 발생할 확률이 일반의 경우에 비하여 세 배나 높은 것으로 보고된 연구 결과도 있다(Kelsey, 1975, Kelsey and Hardy, 1975).

#### (2) 작업 성능의 관점에서

승차 진동은 소음, 조명, 열 환경과 더불어 인간의 작업 성능을 저하시키는 요인으로 인식되어 왔다(Mosely and Griffin, 1986). 차량이나 항공기 내부에서 인간의 작업 특성은 각종 계기로부터 운전이 필요한 정보를 정확하게 판독하고(視覺能力) 그 결과에 따라 핸들이나 조종간을 확실하게 조종하는 것(조종 능력)이다. 따라서, 승차 진동이 인간의 시각 능력과 조종 능력에 미치는 영향을 구명함으로써 효율적인 작업 능력의 유지와 誤操作에 의한 사고의 방지 등 차량 설계에 필요한 기본적인 정보를 제공할 수 있다(李南植外, 1990). 시각 능력은 진동의 강도에 비례하여 저하되며 특히, 10-25Hz의 주파수 범위에서 민감하게 저하된다(Grether, 1971). 計器를 판독할 경우, 34Hz 이하의 주파수 범위에서는 계기만이 진동하느냐 또는 인체와 계기가 동시에 진동하느냐에 따라 진동의 영향이 다르게 나타난다. 일반적으로, 계기만이 진동할 때는 인체와 계기가 동시에 진동할 때보다 판독 오차가 훨씬 큰 것으로 알려지고 있다. 15Hz 이상에서는 어느 경우이나 진동이 없을 때 보다, 1.6m/s<sup>2</sup>에

서는 35%, 25.5m/s<sup>2</sup>에서는 50% 이상 판독 오차가 증가하는 것으로 알려지고 있다(Lewis and Griffin, 1980).

조종 능력에 대한 진동의 영향은 주로 連續 追跡 작업을 대상으로 연구하였다. 대체로, 3-8 Hz의 낮은 주파수 대역에서 추적 성능은 저하되며, 조종 내용에 따라 진동의 영향이 다르게 나타난다. 속도 제어 시스템에서 진동으로 인한 직접적인 영향은 위치 제어 시스템에 비하여 적으나, 제어 시스템이 복잡할수록 진동으로 인한 판단, 인식 능력의 저하 등 진동의 간접적인 영향은 더 크다. 또한, 수동 제어에서 전신 진동은 잔유 영향(residual effect)으로 인하여 진동이 멈춘 후에도 상당 기간 추적 오차의 발생율이 그대로 남아 있다. 전신 진동의 영향을 감소시키기 위하여 조종 장치에 측면 조종간과 팔 지지대를 부착하면 이러한 장치가 없는 경우에 비하여 50% 이상 조종 오차를 감소시킨 것으로 보고된 바있다(Griffin and Lewis, 1978).

## 5. 局所 振動의 특성

국소 진동은 주로 회전톱(chain saw)과 같이 手持 동력 공구를 사용할 때 손, 팔로 전달되는 진동을 대상으로 연구되어 왔기 때문에 여기에서도 손-팔에 대한 진동에 국한하여 설명한다. 국소 진동에 대한 인체의 반응은 진동의 주파수, 진폭, 노출 시간에 따라 변화하며, 진동의 방향, 진동 노출시의 손, 팔, 몸의 자세, 진동에 노출된 손의 넓이와 위치 등에 따라서도 변화한다. 작업자의 기술, 작업 방식, 건강 상태에 따라서도 진동의 영향이 다를 수 있다.

### 가. 국소 진동이 인체에 미치는 영향

손-팔이 매일 장시간 진동에 노출되면 白指 증후군(white finger syndrome)으로 알려진 症狀이 나타나며, 팔 계통의 혈관, 신경, 관절, 뼈 등에 損傷을 초래하는 것으로 알려지고 있다. 白指 증후군은 손의 신경 조직과 동맥에 영향을 주어 손가락 끝을 회색하는 현상이다. 처음에는

손가락 하나에만 이 증상이 나타나지만 계속 진동에 노출되면 다른 손가락에도 일어나며 심하면 두 손에 모두 이 증상이 나타난다. 白指 증후군의 초기 증상은 손가락이 따끔거리고 저리다. 차츰 손을 움직일 수 없는 상태가 되고 감각이 상실된다. 심할 경우는 작업 능력뿐만 아니라 활동성이 저하되고 나아가 영구적으로 불구가 될 수도 있다.

회전톱이나 날카로운 칼을 장시간 사용하는 경우에는 순간적으로 손을 움직일 수 없는 경우가 있으며 감각이 마비될 수도 있다.

## 6. 승차 진동의 평가 기준

승차 진동에 대한 초기의 평가 방법은 주로 피실험자가 승차감의 상태를 '좋다' 혹은 '나쁘다' 등으로 평가하는 피실험자의 주관적인 평가 방법이었다.

이 방법은 최선과 최악의 승차감을 기준으로 하여 승차감의 優劣에 따라 승차 진동을 평가한다. 이 방법은 측정 장비가 필요없고 결과를 바로 알 수 있다는 점에서 유리한 점도 있으나 승차 진동에 대한 피실험자의 느낌과 반응이 다양하기 때문에 실제적으로 승차 진동의 절대적인 수준을 측정하지는 못한다. 다만 상대적으로 승차 진동의 수준을 비교할 수 있을 뿐이다.

그 후 승차감의 우열을 보다 절대적인 값으로 나타내기 위하여 승차 진동에 대한 많은 평가 기준이 제시되었다. 대부분의 평가 기준은 搖動 실험(shaking table experiment)의 결과를 이용하여 설정하였다. 그러나, 실험 결과가 피실험자의 느낌, 나이, 실험시의 기분 등에 따라서 큰 차이가 있었기 때문에 승차 진동의 수준을 평가할 수 있는 객관적인 방법은 되지 못하였다. 객관적인 평가 방법으로는 승차 진동의 수준을 속도, 가속도, 저크(jerk), 吸收 動力(absorbed power) 등 절대적인 물리량으로 표시하는 방법이 제시되었다. 이 객관적인 방법은 피실험자에 의한 영향을 받지 않으므로 보다 객관적인 승차감의 수준을 나타내는 데 유용하였다. 그러나, 지금까지 많은 객관적인 방법들이 제시되었지만 아직 승

차 진동 평가에 대한 방법으로서는 국제적으로 인정된 적절한 방법은 없다.

객관적인 방법과 주관적인 방법의 상관 관계를 연구한 Fine(1964)은 승차 진동의 수준과 차량의 가속도 사이에는 직선적인 관계가 있다고 하였다. 또, Van Deusen(1968)은 도로 주행 실험의 결과를 이용하여 저크(jerk)와 가속도는 주관적인 피실험자의 반응과 좋은 상관 관계가 있으나, 속도와는 관계가 없다고 하였다. Park와 Wambold(1976)는 객관적인 평가 방법으로 진동에 의하여 인체에서 배출되는 에너지와 버스 승객의 반응을 조사하여 상관 관계가 있음을 발견하였다. Park와 Wambold는 또한 인체의 흡수 에너지와 승차감 사이에는 분명한 상

가. 전신 진동의 경우

(1) Dieckman의 기준

Dieckman은 진동 플랫폼 시험과 승차 시험의 결과를 이용하여 승차 진동의 평가 기준으로서 Dieckman 常數를 제시하였다. Dieckman의 상수 K는 5Hz 이하에서는 승차 진동을 가속도로써, 5-40Hz 사이는 속도로써, 40-200Hz 사이는 변위로써 다음과 같이 나타낸다.

$$K = af \quad 0 \leq f \leq 5 \text{ Hz일 때,}$$

$$K = 5af \quad 5 < f < 40 \text{ Hz일 때,}$$

$$K = 200a \quad 40 \leq f \leq 200\text{Hz일 때,}$$

여기서 a=mm 단위로 표시한 승차 진동의 크기,

Table. 1 Exposure time in years for different percentiles of a population for various weighted acceleration.

Weighted acceleration ( $a_w$ , w)eq(4) $m \cdot s^{-2}$	Percentile of population, C				
	10	20	30	40	50
	Exposure time, years				
2	15	23	>25	>25	>25
5	6	9	11	12	14
10	3	4	5	6	7
20	1	2	2	3	3
50	<1	<1	<1	1	1

關 관계가 존재한다고 보고하였다.

일반적으로, 승차 진동에 대한 평가 기준으로 제시된 주관적인 방법과 객관적인 방법들은 각각 그 사이에 많은 類似性이 존재하고 있으나 적절한 기준으로서 어떤 하나를 취하기에는 또 많은 차이점이 있다. Stikeleather(1976)는 많은 실험 데이터와 연구 결과를 정리하여 승차 진동의 평가 기준으로서 다음 세가지를 제시하였다.

- 1) 국제 표준 ISO 2631, 전신 진동의 노출 한계
- 2) 가속도의 rms 값
- 3) 인체의 흡수 동력(absorbed power)

승차감에 대한 주요한 평가 기준에는 다음과 같은 기준이 있다.

f= Hz 단위로 표시한 주파수.

진동을 認識할 수 있는 한계값을 K=0.1로 하고, 참을 수 없는 최고값을 K=100으로 설정하여 K값의 범위에 따라 다음과 같이 승차감을 나타내었다. 즉, K=0.1~1.0의 범위는 진동을 감지할 수 없는 영역에서 약간의 불쾌감을 주는 영역으로, K=1.0~10.0의 범위는 약간의 불쾌감을 주는 영역에서 보통 불쾌감을 주는 영역으로, K=10.0~100.0의 범위는 보통 정도의 불쾌감에서 심한 불쾌감을 주는 영역으로 규정하였다.

(2) Janeway 限界 基準

Janeway는 수직 正弦波 진동에 대한 인체 반응 실험의 결과를 이용하여 승차 진동에 대한 Janeway 한계 기준을 제시하였다. Janeway 한계 기준, J는 승차 진동을 1~6Hz 사이에서는 저크(jerk)로써, 6~20Hz에서는 가속도로써, 20~60 Hz에서는 속도로써 다음과 같이 나타낸다.

$$J = \frac{a}{25.4} f^s$$

$$x=1 \text{ for } 20 \leq f \leq 60\text{Hz}$$

$$x=2 \text{ for } 6 < f < 20\text{Hz}$$

$$x=3 \text{ for } 1 \leq f \leq 6 \text{ Hz}$$

여기서 a=승차 진동의 크기 (mm),

f=주파수(Hz),

J=Janeway 한계 기준.

주파수 범위에 따라 승차 진동에 대한 J의 한계값은 다음과 같다.

$$f = 1 \sim 6\text{Hz} \text{ 일 때 } J=2$$

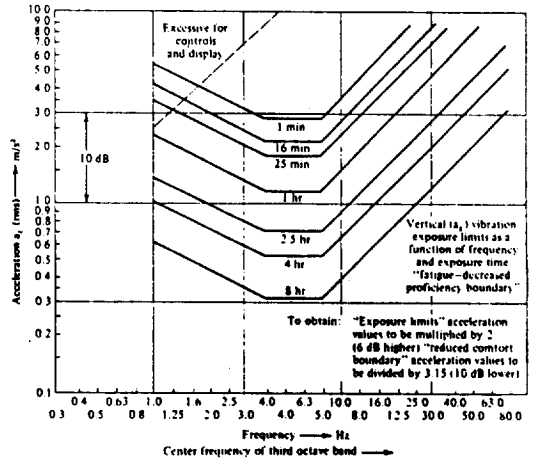
$$f = 6 \sim 20\text{Hz} \text{ 일 때 } J=1/3$$

$$f = 20 \sim 60\text{Hz} \text{ 일 때 } J=1/60$$

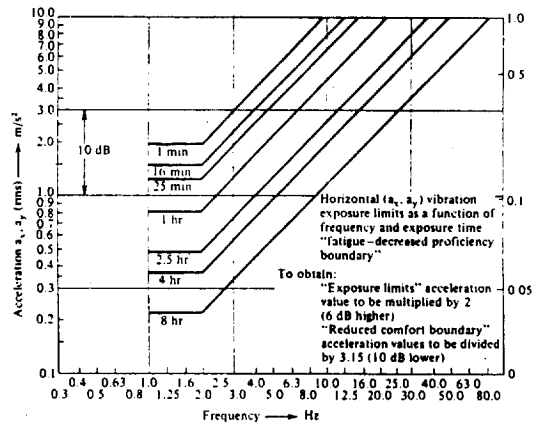
저주파 범위에서 불쾌감을 느끼기 시작할 때와, 극도의 불쾌감을 느끼기 시작할 때의 J는 각각 J=2.8과 J=9.6이다.

(3) ISO 2631

국제표준기구(International Standard Organization, ISO)에서는 인체 진동에 대한 최근의 실험 결과를 이용하여 수직 및 수평 진동에 대한 인체의 전신 진동 노출 한계로서 ISO 2631 '인체의 전신 진동 노출에 관한 평가 기준,1985(E)'을 제정하였다. ISO 2631은 한계 기준을 안전 및 건강을 기준으로 한 露出 限界(exposure limit), 작업의 효율성을 기준으로 한 耐疲勞 限界(fatigue decreased proficiency boundary), 편안함을 기준으로 한 快適 限界(reduced comfort boundary)로 구분하였다. 각각의 노출 한계는 1분에서 24시간까지 작업 시간별로 구분하여 1-80Hz의 범위에서 1/3옥타브 중심 주파수에 대한 주파수 가중 RMS 가속도의 크기로서 표시하였다. 그림 5(a)와 (b)는 각각 수평 및 수직 진동에 대한 ISO 2631의 내피로 한계를 나타낸 것이다.



(a) Longitudinal( $a_z$ ) acceleration limits as a function of frequency and exposure time : Fatigue-decreased proficiency boundary.



(b) Transverse( $a_x, a_y$ ) acceleration limits as a function of frequency and exposure time : Fatigue-decreased proficiency boundary.

Fig. 5. ISO 2631

ISO 2631의 특징은 각 주파수에 대한 인체의 민감도가 고려되어 있으며, 수직 진동의 경우에는 4-8Hz 영역에서, 수평 진동의 경우에는 2Hz 이하의 주파수 영역에서 노출 한계가 가장 낮다. 또한, ISO 2631은 1-80Hz의 진동수에 대해서만 적용될 수 있으며 1Hz 이하나 80Hz 이상의 진동 혹은 회전 진동에 대한 노출 한계는 아직 그 한계가 設定되어 있지 않다. ISO 2631에서 채택



한계와 노출 한계는 내피로 한계로부터 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\text{쾌적 한계} = \frac{\text{내피로 한계}}{3.15(10 \text{ dB})}$$

$$\text{노출 한계} = 2.0(6 \text{ dB}) \times \text{내피로 한계}$$

만약 x, y, z 축의 진동에 동시에 노출되었을 경우에는 다음과 같은 방법으로 가중 가속도의 합 a를 구하여 사용한다.

$$a = \sqrt{(1.4a_x)^2 + (1.4a_y)^2 + a_z^2}$$

a<sub>i</sub> = i 방향의 가중 가속도

i = x, y, z

ISO 2631은 승차 진동을 평가하는 데 적용할 수 있는 가장 보편적인 기준으로서, 국제적으로도 인정되고 있으나 다음과 같은 단점이 있다.

- 1) 1시간의 노출 시간에 대한 쾌적 한계와 내피로 한계의 수준이 너무 높다.
- 2) 신체의 크기, 피로의 정도 등 개인적인 차이가 전혀 고려되지 않았다.
- 3) 각 진동축에 대한 진동의 영향을 단순한 선형 결합으로 가정하였다.
- 4) 편안함, 작업 성능, 건강과 안전을 기준으로 한 서로 다른 한계 수준에 대하여 동일한 형태의 주파수 加重值를 사용하였다
- 5) 노출 시간과 진동 사이의 相衝效果(trade-off)를 뒷받침할 만한 실험적 근거가 미약하다.

#### (4) 흡수 동력

Lee와 Pradko(1968)는 승차 진동의 평가 기준으로서 인체의 흡수 동력(absorbed power)을 제시하였다. 인체의 吸收 動力은 진동의 영향으로 인체에서 소멸되는 에너지의 消滅率(dissipation rate)을 말한다. 이 방법은 多自由度 시스템에서도 각각의 자유도에 따라 진동의 영향을 측정하지 않고 전체적으로 승차감을 평가할 수 있다. 즉, 손이나 발의 진동뿐만 아니라 수직과 수평 진동에 동시에 노출되었을 때 흡수 동력 하나로서 전체 진동의 영향을 나타낼 수 있다.

흡수 동력은 또 실제 측정이 가능하고, 해석적으로도 계산이 가능하다는 데 그 특성이 있다.

승차 진동을 주파수 스펙트럼으로 분석하였을 때 흡수 동력은 다음과 같이 계산한다.

$$AP_{avg} = \sum_{i=1}^N K_i \times A_i^2, \text{ rms,}$$

여기서

AP<sub>avg</sub> = 평균 흡수 동력(FL/T),

A<sub>i rms</sub> = 주파수가 i인 진동 성분의 크기, rms값

K<sub>i</sub> = 주파수 i의 진동에 대한 흡수

동력의 상수  $\left(\frac{FL/T}{(L/T^2)^2}\right)$

수직, 전후, 좌우, 피치(pitch), 롤(roll) 진동에 대한 K<sub>i</sub>의 값은 Lee와 Pradko(1968)가 제시한 값을 사용한다.

승차 진동을 시간 함수로 나타내었을 때 흡수 동력은 다음 식으로 구할 수 있다.

$$AP_{avg} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T F(t) \times V(t) dt$$

여기서

F(t) = 입력한 힘(F),

V(t) = 입력한 속도(L/T).

따라서, 흡수 동력은 힘이 작용하는 지점에서 힘과 속도를 직접 측정하여 구할 수 있다. 흡수 동력은 승차감에 대한 주관적인 평가로서, 절대적인 승차 진동의 수준을 나타내기에는 어려우나 진동 형식, 강도, 주파수 성분, 몸의 방향과 자세 등을 모두 고려하여 승차감을 나타낼 수 있는 값이다. 승용차에서 흡수 동력의 한계는 0.2-0.3 와트(watt), 路外 車輛에서는 6-10와트 범위에 있는 것으로 알려지고 있다. 그러나, 일반적으로 0.5-0.6와트 범위에서 승차감은 대체로 양호한 것으로 알려지고 있다(Lee and Pradko, 1968).

#### 다. 국소 진동의 경우

##### (1) ISO 5349

본 연구에서는 손을 통하여 팔로 전달되는 국소 진동에 국한하여 그 평가 기준을 고찰하였다. 손을 통하여 팔로 전달되는 국소 진동에 대한 평가 기준으로는 ISO 5349가 있다. ISO 5349는 6~1,250Hz의 주파수 범위에서 주파수 가중 에너지 등가 가속도(frequency-weighted energy equivalent acceleration)를 이용한 손 진동 분석

방법과 일일 4시간 노출에 대한 한계 진동의 지침을 제시한 것으로서, 국제적으로 공인된 안전 노출 한계를 제시한 것은 아니다. 따라서, ISO 5349는 公認된 기준이라기 보다는 제안된 하나의 試案이라고 할 수 있다. 그림 6은 ISO 5349의 부록으로서, 1일 기준 작업 시간을 4시간으로 하여 白指 증후군이 일어나는 데 필요한 손 진동의 크기와 총 노출 시간을 인구 퍼센터(%)에 따라 나타낸 것이다. 이 기준에 의하면, 1일 4시간 씩 주파수 가중 가속도로써  $7\text{m/s}^2$  rms 이상의 손 진동에 노출되면 대부분의 사람은 10년 이내에 백지 증후군을 보이는 것으로 나타나고 있다.

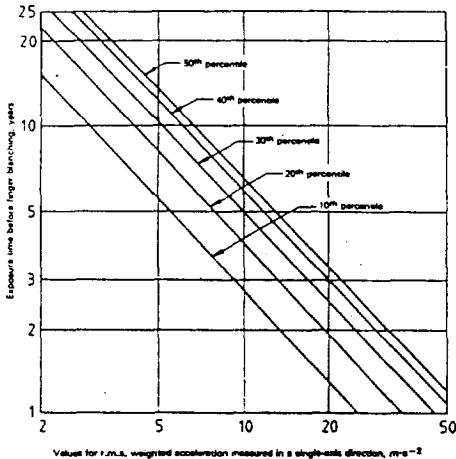


Fig. 6 Exposure time for different percentiles of a population group exposed to vibration before episodes of finger blanching occur.

### 7. 要約 및 結論

본 논문은 농용 트랙터에서 예상되는 승차 진동의 문제를 提起하고, 인체 진동의 개념, 승차 진동이 운전자에게 미치는 영향, 인체 진동의 평가 기준 등을 문헌을 통하여 考察하였다. 농용 트랙터의 승차감 수준을 평가하는 데 사용할 수

있는 인체 진동의 평가 기준으로는, 일부 불완전한 점은 있으나, ISO 2631 '인체의 전신 진동 노출에 관한 평가 기준'이 가장 적합한 것으로 판단된다.

### 參 考 文 獻

1. Dieckmann, D. 1947. Einfluss vertikaler mechanischer Schwingungen auf den Menschen. Internat. Z. angew. Physiol. einschli. Arbeitsphysiol. Bd.16, S., pp519-564.
2. Fine, R. 1964. Correlation of vertical acceleration and human comfort in a passenger car. SAE Journal, January, 1964.
3. Fothergill, L. C. and M. J. Griffin. 1977. The subjective magnitude of whole-body vibration. Ergonomics 20: 531-533.
4. Gerke, F. G. 1978. Measurement of terrain input vibration in farm tractors. Unpublished MS thesis. University of Illinois at Urbana-Champaign.
5. Gierke, H. E. 1975. The ISO Standard, Guide for the evaluation of human exposure to whole-body vibration. NASA TM X-3295, DOT-TSC -OST- 75-40, pp.565-580.
6. Grag, D. P. and M. A. Ross. 1976. Vertical mode human body vibration transmissibility. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Vol. SMC-6, No. 2, p102-112
7. Grether, W. F. 1971. Vibration and human performance. Human Factors 13(3): 203-216, 1971.
8. Gruber, G. J. 1976. Relationship between whole-body vibration and morbidity patterns among interstate truck drivers. U.S DHEW/NIOSH Public. No.77-167.
9. Gruber, G. J. and H. H. Ziperman. 1974. Relationship between whole-body vibration and morbidity patterns among motor coach operators. U.S DHEW/NIOSH Public. No.75-104.

10. Gundry, A. J. 1978. Thresholds of perception for periodic linear motion. *Space and Env. Med* 49 : 679-686
11. International Organization for Standardization. 1985. Guide for the evaluation of human exposure to whole-body vibration (ISO 2631 /1), Geneva, ISO.
12. International Organization for Standardization. 1986. Mechanical vibration-Guidelines for the measurement and the assessment of human exposure to hand-transmitted vibration. (ISO 5349), Geneva, ISO.
13. International Organization for Standardization. 1986. Forestry machinery-chain saws - measurement of hand-transmitted vibration. (ISO 7505). Geneva, ISO.
14. Janeway, R. N. 1948. Passenger vibration limits. *SAE Journal* 56(8) : 48.
15. Kelsey, J. L. 1975. An epidemiological study of the relationship between occupations and acute herniated lumbar intervertebral disc. *Int. J. Epid* 4 : 197-205
16. Kelsey, J. L. and R. J. Hardy. 1975. Driving of motor vehicles as a risk factor for acute herniated intervertebral disc. *Amer. J. Epid* 102 : 63-73.
17. Kim, K. U., Hoag, D. L. and Hunt, D. R. 1985. Ride simulation of passive, active, and semi-active seat suspensions for off-road vehicles. *Transactions of the ASAE* 28(1) : 56-64.
18. Liljedahl, J. B., W. M. Carleton, P. K. Turnquist and D. W. Smith. 1979. Tractors and their power units. 3rd ed. John Wiley & Sons.
19. Lee, R. A. and F. Pradko. 1968. Analytical analysis of human vibration. *Transactions of SAE* 77(1) : 346-360.
20. Lewis, C. H. and M. J. Griffin. 1978. Predicting the effects of dual frequency vertical vibration on continuous manual control performance. *Ergonomics* 21 : 637-650.
21. Lewis, C. H. and M. J. Griffin. 1980. Predicting the effects of vertical vibration frequency, combinations of frequencies and viewing distance on reading of numeric displays. *Journal of Sound and Vibration* 70 : 355-377.
22. Macduff, J. N. 1969. Tansient testing of man. *Sound and Vibartion*, August, p16-21
23. Mattews, J. 1972. The Ergonomics of tractor design and operation. Proceedings of the XVI CIOSTA Congress. Wageningen, The Netherlands.
24. Mattews, J. 1973. The Measurement of tractor ride comfort. *Transactions of the SAE* 82 : 2712-2727
25. Milby, T. H. and R. C. Spear. 1974. Relationship between whole-body vibration and morbidity patterns among heavy equipment operators. U.S DHEW/NIOSH Public. No.74-131.
26. Mosely, M. J. and M. J. Griffin. 1986. Effects of display vibration and whole-vibration on visual performance. *Ergonomics* 29 : 977-983.
27. Park, W. H. and J. C. Wambold. 1976. Objective ride quality measurement. *Transactions of the SAE* 85 : 1312-1321.
28. Rasmussen, G. 1982. Human body vibration exposure and its measurement. Technical review. *Bruel & Kjaer*. 1,3-31.
29. Rossegger, R. and S. Rossegger. 1960. Health effects of tractor driving. *J. Agirc. Engrg. Res.* 5(3) : 241-275.
30. SAE J1013. 1980. Measutement of whole body vibration of the seat operator off-highway work machines. *SAE Recommended Practice*.
31. Seris, H. and R. Aufret. 1967. Measurement of low frequency vibration in big helicopters and their transmission to the pilot. NASA Technical Translation Reort. NASA-TTF-471.

32. Shanahan, D. F. and T. E. Reading. 1984. Helicopter pilot back pain : A preliminary study. Aviation Space and Envir. Medicine 55 : 117-121.
33. Shoenberger, R. W. and C. S. Harris. 1971. Psychophysical assessment of whole-body vibration. Human Factors 13 : 41-50.
34. Spear, R. C. 1974. Morbidity patterns among heavy equipment operators exposed to whole-body vibration : Follow-up to a 1974 study. U.S DHEW/NIOSH Public. No.77-120.
35. Stikeleather, L. F. 1976. Review of ride vibration of standards and tolerance criteria. Transactions of the SAE 82 : 1460-1467.
36. Stikeleather, L. F. 1990. Seat vibration and ride comfort. Department of biological and agricultural Engineering. Paper No. 90-07.
37. Suggs, C. W. 1973. Agricultural machinery noise and vibration levels in comparison to human comfort and safety limits. ASAE Paper 73-524.
38. Van Deusen, B. D. 1968. Human reponse to vehicle vibration. Transactions of the SAE 77 : 328-345.
39. Wong, J. Y. 1978. Theory of ground vehicles. John Wiley & Sons, Inc.
40. 李南植, 朴世鎭, 金鐵中, 1990, 전신 진동이 인간 성능에 미치는 영향에 대한 연구. 제 1회 전투차량 개발 기술 학술 대회 논문집, 국방과학연구소.
41. 李舜堯. 1992. 인간 공학. 박영사.
42. 全聖鐸. 1991. 소음 진동 편람-진동편. 동화기술