

농용 트랙터의 과도 진동 분석

Analysis of Transient Vibration of Agricultural Tractor

김용준* 김경욱*
정회원 정회원
Y.J.Kim K.U.Kim

1. 서론

트랙터는 그 특성상 비포장의 농로를 주행해야 하기 때문에 불규칙한 노면으로부터 발생되는 진동에 노출될 수밖에 없다. 불규칙한 노면 중에서도 움푹 패인 곳 또는 논둑을 넘어갈 때, 트랙터는 짧은 시간 동안 큰 가진을 받는데, 이러한 가진에 의하여 트랙터에는 과도 진동이 발생하게 된다. 트랙터에는 차륜에 현가 장치가 없기 때문에 이러한 과도 진동은 그 크기가 클 뿐만 아니라 발생 빈도도 높아, 차체의 결합 부분을 이완시키거나 강도를 약화시키는 원인이 된다. 특히, 과도 진동은 운전자가 고통을 호소할 정도의 심각한 수준으로서, 작업 능률에도 나쁜 영향을 미치고 있다.

최근에는 wavelet transform과 short time Fourier transform을 이용하여 시간과 주파수 정보를 동시에 구명하기 위한 시간-주파수 분석(time-frequency analysis) 방법이 이용되고 있다. 특히, wavelet transform은 시스템의 과도 응답을 분석하는 데 적절한 방법인 것으로 인정되고 있으나(Galli 등, 1998; Jordan 등, 1998), 아직까지 트랙터에 적용된 예는 없다.

현가 장치가 없고, 주로 비포장의 농로를 주행하는 트랙터에는 과도 진동의 발생 빈도가 높고 그 크기 또한 매우 크다. 따라서, 과도 진동의 특성을 구명하여 과도 진동의 특성이 승차 진동에 미치는 영향을 구명하고, 진동을 줄이기 위한 설계 방향을 제시하기 위한 연구가 요구된다.

본 연구는 시간-주파수 분석법을 이용하여 트랙터의 과도 진동 특성을 분석하고, 승차 진동에 영향을 미치는 과도 진동의 주파수 모드를 구명하기 위한 것이다. 이는 승차 진동 수준을 줄이기 위한 트랙터 설계의 기초 자료로서 활용될 수 있을 것이다.

2. 시간-주파수 변환의 원리

시간 영역의 신호 $f(t)$ 의 short time Fourier transform(STFT)은 다음과 같이 정의된다.

$$STFT(u, \xi) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t)g_{u, \xi}(t) dt$$

여기서, $g_{u, \xi}(t) =$ 시간-주파수 변환 인자

$g_{u, \xi}(t)$ 는 다음과 같이 정의된다.

* 서울대학교 생물자원공학부 농업기계전공

$$g_{u,\xi}(t) = e^{i\xi t}g(t-u)$$

여기서, $g(t)$ = 창함수(window function)

u = 시간축 변수

ξ = 주파수축 변수

또한, 시간 영역 신호 $f(t)$ 의 wavelet transform(WT)은 다음과 같이 정의된다.

$$WT(u, s) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t)\psi_{u,s}^*(t) dt$$

여기서, $\psi_{u,s}^*$ 을 웨이블릿이라고 하며, 시간-주파수 분석에서는 주로 다음과 같이 정의되는 Gabor 웨이블릿이 사용되고 있다.

$$\psi(t) = e^{i\eta t}g(t)$$

여기서, $\psi(t)$ = gabor wavelet

$g(t)$ = gaussian window

η = frequency modulation factor

시간-주파수 변환의 결과는 시간, 주파수, 크기의 3차원 그래프로 표현되며, 시간-주파수 평면의 영역에 대응되어 그 크기가 표시된다. STFT와 WT의 시간-주파수 평면 분해능은 그림 1, 그림 2에서와 같다.

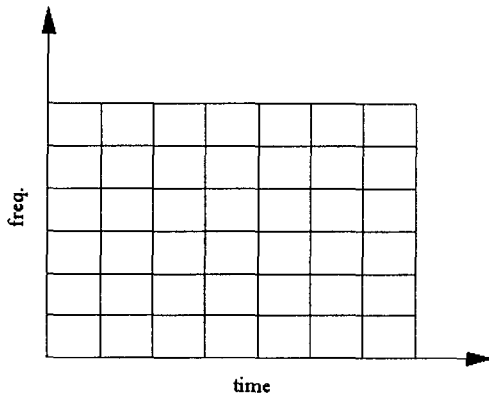


Fig. 1 Time-freq. resolution of STFT.

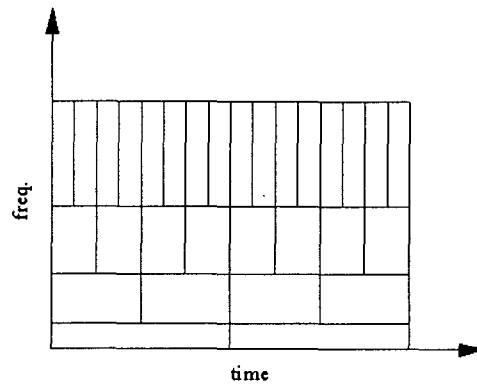


Fig. 2 Time-freq. resolution of WT.

3. 지면 가진 실험

본 연구에서 사용한 트랙터는 고유 주파수 모드가 구명된(Park, 1998) 국내 L사의 47마력 모델이었다. 지면 가진에 의한 트랙터의 좌석 진동을 측정하기 위하여 좌석에 가속도계를 부착하였고, 간단히 제작된 사각 범프를 통과하는 주행 실험을 실시하였다. 일반적으로 불규칙한 지면의 가진 주파수는 50 Hz 이하이므로(Laib, 1970), 사각 범프의 높이와 폭을 각각

3.2 cm로 하고 트랙터의 주행 속도를 2.05 m/s로 하였다.

5. 시간-주파수 분석 결과

시간-주파수 변환의 결과는 시간, 주파수, 크기의 3차원 그래프로 표현되나, 시간에 따른 주파수 분포를 명확히 볼 수 있도록 시간-주파수 평면의 2차원으로, 진동의 크기가 크면 클수록 검은 색으로 진하게 표시되도록 하였다.

양쪽 바퀴가 동시에 범프를 통과하였을 때 좌석의 가속도 신호를 STFT 수행한 결과를 그림 3에, WT 수행한 결과를 그림 4에 나타내었다.

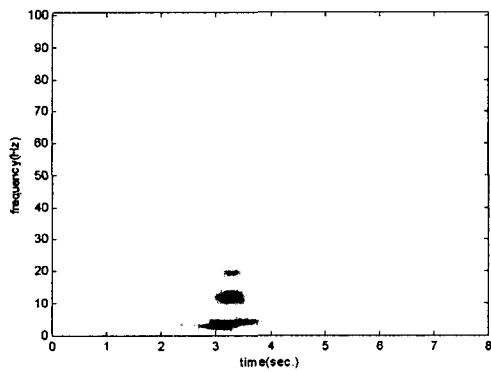


Fig. 3 Spectrogram of accelerations at seat when the tractor passed over the rectangular-bump with four wheels.

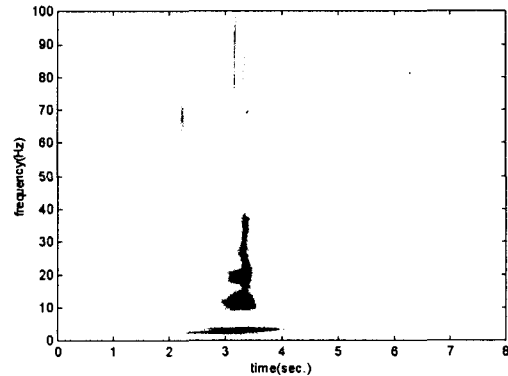


Fig. 4 Scalogram of accelerations at seat when the tractor passed over the rectangular-bump with four wheels.

표 1에 나타낸 트랙터의 고유 주파수 모드를 참고하였을 때, 범프 통과로 인한 과도 진동으로 인하여 차체의 수직 모드, 엔진과 캡의 피칭 모드가 가진되어 좌석 진동에 영향을 미치는 것으로 나타났다.

Table 1 Natural frequencies and associated modes

Natural frequency(Hz)	Mode
4.625	Vertical mode of chassis
10.750	Pitching mode of engine
22.000	Pitching mode of cab
34.375	Vertical mode of cab
38.000	Vertical mode of engine
49.625	Vertical mode of seat-base

또한, 시간-주파수 평면 분해능의 차이로 인하여 그림 3에서는 약 5 Hz의 저주파수 대역에서 앞바퀴와 뒷바퀴 가진에 의한 응답을 구별할 수 있으나, 그림 4에서는 구별하기가 어

려운 것으로 나타났다. 따라서, 본 연구와 같이 저주파수 대역의 시간과 주파수 정보를 대상으로 하고 있는 경우에는 시간축과 주파수축 전 영역에서 일정한 분해능을 갖고 있는 STFT가 적절한 신호 분석 방법인 것으로 판단된다.

STFT 수행에 이용되는 창함수의 연속으로 0이 아닌 구간(support)을 변화시키면 시간-주파수 평면의 분해능이 변화되는 특성을 이용하여 그림 3에 이용된 창함수의 support를 약 0.4배로 하여 STFT를 수행한 결과는 그림 5에서와 같다.

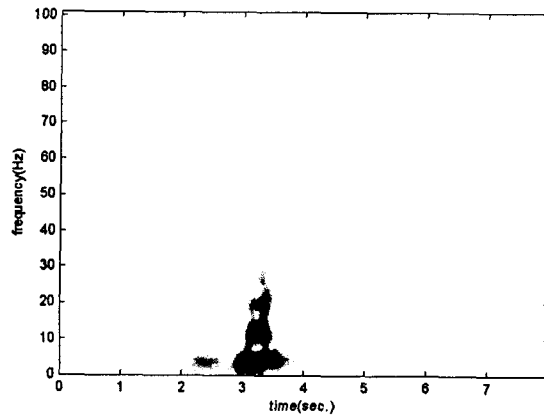


Fig. 5 Sepctrogram using shorter time support of window function compared to the window function used in figure 3.

창함수의 길이를 작게한 결과, 시간축의 분해능은 향상되었으나, 주파수축 분해능은 악화되었음을 확인할 수 있었다. 시간축 분해능이 향상됨으로써, 차체의 수직 방향 고유 진동수인 5 Hz 부근과 엔진의 피칭 방향 고유 진동수인 10 Hz, 캡의 피칭 방향 고유 진동수인 20 Hz 부근의 검은 부분이 약간의 시간 차이를 두고 나타난 것으로 확인되었다. 이는 후륜이 범프를 통과하고 난 직후, 차체의 피칭 운동에 의하여 엔진의 피칭 모드와 캡의 피칭 모드가 가진 되어 좌석으로 전달되기 때문인 것으로 판단된다.

6. 진동 전달 경로 분석에의 응용

신호를 시간 영역과 주파수 영역에서 동시에 볼 수 있는 시간-주파수 분석의 특성을 이용하여 진동이 전달되는 경로를 분석할 수 있다.

지면 가진에 의하여 마운트를 통하여 캡으로 전달된 진동 에너지가 좌석으로 전달되는 현상을 분석하기 위하여 각각 네 개의 바퀴가 가진을 받을 때 바퀴에서 가장 가까운 캡의 마운트 위쪽 지점의 가속도 신호와 좌석의 가속도 신호를 시간-주파수 변환하였다. 한쪽 바퀴가 범프를 통과할 때 캡의 마운트 지점에서 측정된 가속도 신호를 STFT, WT 수행한 결과 차체의 수직 방향 고유 진동수가 큰 에너지를 갖고 있었으므로, 0-10 Hz의 저주파수 대역에서도 시간 축의 분해능을 확보할 수 있는 STFT을 이용하여 캡의 각 마운트 위쪽 지점과

좌석의 진동 크기를 비교하였다.

가속도 측정시 캡의 각 마운트 위쪽의 지점에서 가장 큰 에너지가 전달될 때, 좌석의 진동 에너지를 구하여 짧은 시간에 나타나는 최대 에너지의 비(seat/mount)를 구하여 진동 전달 경로를 분석하였다. 표 2는 4회 측정된 실험 결과를 평균한 값이다. 캡의 각 마운트 지점에서 나타난 차체의 수직 방향 고유 진동이 좌석으로 전달되어 나타날 때까지의 시간을 구하였고, dB 값으로 나타낸 가속도의 크기로 진동의 크기를 비교하였다.

Table 2 Result of vibration path analysis using short time Fourier transform

Side	Mount (dB ref. 10^{-6} m/s ²)	Seat (dB ref. 10^{-6} m/s ²)	Time delay (sec.)	Seat/Mount
Front-Left	97.614	70.399	0.082	0.721
Rear-Left	102.637	79.200	0.033	0.772
Front-Right	97.880	71.158	0.098	0.727
Rear-Right	103.55	80.417	0.034	0.777

하나의 바퀴가 가진 되었을 때 좌석에 전달된 차체의 고유 진동은 캡에 전달된 차체의 고유 진동에 비하여 약 70% 수준인 것으로 나타났다. 또한, 좌석이 캡의 뒤쪽에 위치하고 있는 이유로 인하여 진동이 캡의 앞쪽 마운트 위치에서 좌석으로 전달될 때까지의 시간이 앞쪽으로부터 전달되는 시간 보다 더 짧았고, 앞쪽의 마운트로부터 전달되는 차체의 수직 고유 주파수의 진동 에너지가 뒤쪽으로 전달되는 진동 에너지보다 좌석의 진동에 미치는 영향이 작았다.

좌석으로 전달되는 진동 에너지의 크기만을 고려한다면 트랙터 주행 방향을 기준으로 하였을 때, 차체의 수직 고유 진동에 의한 좌우측 진동 에너지의 비는 그 차이를 무시할 수 있는 수준이었다.

7. 요약 및 결론

시간-주파수 분석(time-frequency analysis)에 이용되고 있는 short time Fourier transform(STFT)과 wavelet transform(WT)을 소개하고, 트랙터가 범프를 통과할 때 좌석의 과도 진동을 측정하여 푸리에 변환과 STFT, WT를 수행하였다.

신호 분석 결과, 본 연구에서와 같이 저주파수 대역의 고유 진동을 대상으로 할 경우, 시간-주파수 분석법을 적용하는 데는 전 주파수 대역에서 일정한 주파수축 분해능과 시간축 분해능을 갖고 있는 STFT이 WT 보다 적절한 신호 분석 방법인 것으로 판단되었다.

과도 진동이 발생하였을 때, 트랙터의 좌석에 나타나는 진동은 차체의 수직 모드, 엔진의 피칭 모드, 캡의 피칭 모드의 고유 진동수의 영향을 받는 것으로 나타났다. 특히, 시간-주파수 분석 결과, 후륜이 범프를 통과한 후에 좌석에 엔진의 피칭 모드와 캡의 피칭 모드의 고

유 진동이 발생하는 것으로 나타났다. 또한, 시간축의 분해능을 향상시킴으로써 이러한 고유 진동의 발생 순서를 밝힐 수 있었으며, 이로부터 푸리에 변환으로는 구별하기 힘든 주파수를 시간-주파수 변환으로 구별할 수 있는 가능성을 확인할 수 있었다.

시간-주파수 분석으로부터 실제 주행 조건에서 진동 에너지가 전달되는 경로와 그 크기를 구명하고, 마운트를 통하여 캡으로 전달된 진동이 좌석에 전달될 때 진동 크기의 감쇠비를 측정하였다. 앞쪽의 마운트로부터 캡으로 전달된 진동 에너지가 뒤쪽의 마운트로부터 캡으로 전달된 진동에너지 보다 작았으며, 좌석에 대한 진동 에너지 감쇠비도 작았다. 또한, 트랙터 주행 방향을 기준으로 좌우측 진동 감쇠비의 차이는 무시할 수 있는 수준인 것으로 판단되었다.

본 연구의 결과는, 트랙터 뿐만 아니라, 다른 농업 기계의 과도 진동을 분석하는 데에도 응용될 수 있으며, 좌석 진동에 큰 영향을 미치는 고유 주파수를 구명하는 데에도 기초 자료로 활용될 수 있을 것이다.

8. 참고 문헌

1. 이장무. 1997. 모드 해석의 이론과 응용. 서울대학교
2. Choy, H. J. 1998. Optimum design of cab suspension for agricultural tractors. Unpublished MS thesis, Seoul National University, Suwon, Korea.
3. Galli, A. W. and O. M. Nielsen. 1998. Wavelet analysis for power system transients. IEEE computer applications in Power. Vol 12(1):16-25.
4. Jordan, D. A., D. C. Weggel, R. W. Miksad, J. M. Roesset. 1998, Wavelet analysis of the transient response of spar platforms. Proceedings of the eighth International Offshore and Polar Engineering Conference. May 24-29, 1998, Montreal, Canada, Vol 1(1):291-297.
5. Laib, L. 1977. Measurement and mathematical analysis of agricultural terrain and road profiles. Journal of Terramechanics 14(2):83-97.
6. Park. H. J. 1998. Simulation of dynamic characteristics of agricultural tractor. Unpublished Ph.D thesis, Seoul National University, Suwon, Korea.
7. Pershing, R. L. , and R. R. Yoerger. 1968. Simulation of tractors for transient response. Winter Meeting American Society of Agricultural Engineers, December 10-13, 1968, Chicago, Illinois.
8. Raghuvver M. Rao, Ajit S. Bopardikar. 1998. Wavelet transforms: Introduction to Theory and Applications. Addison-Wesley.
9. Stephane Mallet. 1998. A wavelet tour of signal processing. Academic Press.