

농용 트랙터의 주요 설계 변수가 좌석 진동에 미치는 영향 Effect of Design Parameters of Agricultural Tractors on Seat Vibration

박홍재*
정회원
H. J. Park

김경욱*
정회원
K. U. Kim

1. 서론

농용 트랙터에서 동특성 및 좌석 진동의 예측과 분석을 위해서 많은 동적 모델이 개발되었다. 그러나, 이러한 동적 모델은 기관과 지면 가진 및 다양한 구조적인 설계 변수를 포함하지 않았기 때문에 트랙터 전체를 하나의 동적 시스템으로 고려한 좌석 진동을 분석하는 것은 불가능하였다(Park, 1998).

본 연구에서는 다양한 설계 변수를 포함한 트랙터의 기관, 지면, 트레일러에 의한 좌석 진동을 구명하기 위해 3차원 16자유도의 동적 트랙터-트레일러 모델과 컴퓨터 시뮬레이션 프로그램을 개발하였다. 트랙터를 이용한 작업의 50 % 정도를 차지하는 운반 작업의 대부분이 트레일러에 의해 수행되기 때문에(김, 1995; Kising 등, 1989) 작업기로는 트레일러를 모형화하였다.

시뮬레이션 프로그램의 입력 파라미터로 이용할 수 있는 설계 변수로는 차체, 기관, 캡, 좌석, 트레일러의 위치, 질량, 질량 중심, 결합 재질 등이 있다. 본 연구는 다양한 가진력에 의한 좌석 진동을 저감시킬 수 있는 트랙터 구조를 구명할 수 있을 것으로 판단되며 나아가서 농용 트랙터의 승차감을 향상시킬 수 있을 것이다.

2. 동적 모델의 개발

트랙터의 동특성과 좌석 진동을 예측하고 분석하기 위한 3차원 16자유도 동적 트랙터-트레일러 모델을 개발하였다. 동적 모델은 그림 1에서와 같이 트랙터 차체(z_b, β_b, γ_b), 전차축(z_x, β_x), 트레일러(z_t, β_t, γ_t), 기관(z_e, β_e, γ_e), 캡(z_c, β_c, γ_c), 좌석 기부(z_s, β_s, γ_s), 그리고 작업자를 포함한 좌석(z_h)의 7개 주요 구성품으로 이루어진 총 18개의 미분 방정식으로 유도되었다. 여기에, 전차축과 트레일러가 차체에 힌지 고정되어있는 제약 조건을 적용하면, 18개의 미분 방정식은 16개의 독립적인 2차 미분 방정식으로 정리되며 행렬로 나타내면 다음과 같다.

$$[M]\{\ddot{x}(t)\} + [C]\{\dot{x}(t)\} + [K]\{x(t)\} = \{f(t)\} \quad (1)$$

여기서, $[M]$, $[C]$, $[K]$ 는 각각 관성, 감쇠, 강성 행렬이며, $\{f(t)\}$ 는 가진 벡터이다.

개발된 운동 방정식 (1)의 시간 영역에서의 변위, 속도, 가속도 응답을 구하기 위해서

* 서울대학교 농업생명과학대학 생물자원공학부

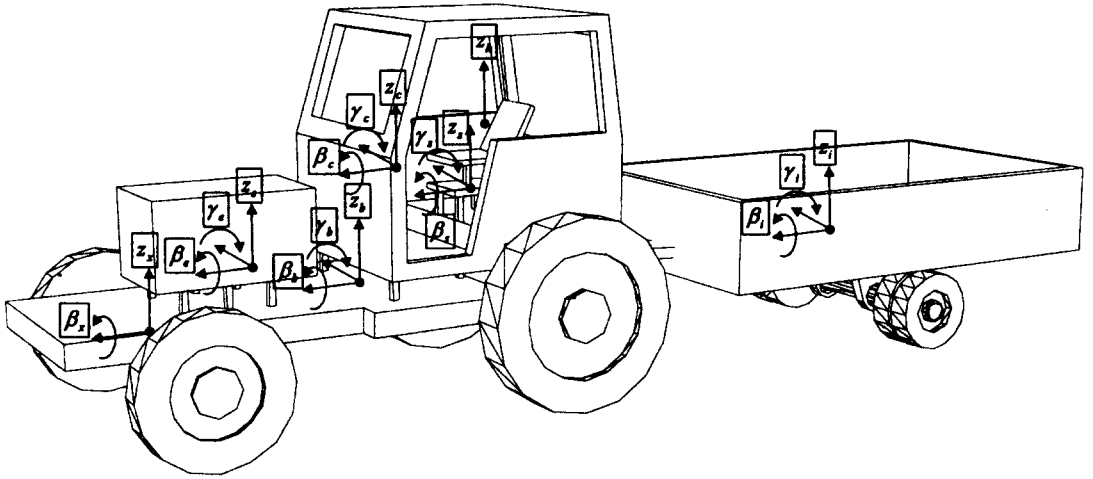


Fig. 1. 3 dimensional 16 degree-of-freedom dynamic tractor-trailer model.

천이행렬법(transition matrix method)을 이용하였으며, 이론적인 모드 해석을 위해서 QR 알고리즘을 적용하였다(Meirovitch, 1986). 시뮬레이션 프로그램은 좌표 변환을 이용하여 좌석에서의 응답뿐만 아니라, 트랙터 각 주요 구성품의 임의의 위치에서의 응답도 예측할 수 있다. 또한, 시스템의 고유 진동수와 진동 모드들은 표준 고유치 문제로부터 계산된 고유치와 고유 벡터들로부터 구해진다.

3. 좌석 진동 저감을 위한 트랙터 설계 방안

기관의 가진 주파수는 회전 속도에 따라 정해지며, 불규칙한 지면에 의한 가진 주파수는 일반적으로 50 Hz 이하에 분포된다(Laib, 1977). 그러므로, 트랙터 좌석 진동을 구명하기 위한 지면 가진은 50 Hz 이하의 모든 주파수로 가진할 필요가 있다. 트랙터의 주행 속도 3 m/sec에서 길이 0.06 m, 높이 0.01 m의 반사인 범프를 통과할 때의 동적 시스템은 50 Hz 이하에서 그림 2에서와 같이 임펄스처럼 가진된다. 반사인 범프의 높이는 자기 스펙트럼(autospectrum)의 주파수 분포에는 영향을 미치지 않고 절대값에만 영향을 미치기 때문에 임의로 선택하였다. 또한, 지면에 의한 트랙터 후차륜의 가진시 좌석 가속도의 주파수 응답이 다른 차륜에 의한 주파수 응답에 비해 평균 20 dB 이상 민감하게 응답하였다. 따라서 개발된 트랙터-트레일러 모델은 지면에 의한 트랙터 후차륜의 가진시 주요 설계 변수의 변화에 따른 좌석에서의 수직 방향 가속도의 주파수 응답을 분석하였다.

그림 3은 기관의 회전 속도가 1,000 rpm에서 지면 가진에 의한 좌석 진동의 자기스펙트럼이다. 그림에서 50 Hz 이하에서 5개의 고유 진동수에서와 기관의 회전 속도에 따른 가진 주파수가 좌석에서의 수직 방향 가속도에 영향을 미친다. 이 5개의 고유 진동수와 진동 모드는 QR 알고리즘에 의해 표 1과 같이 구해진다.

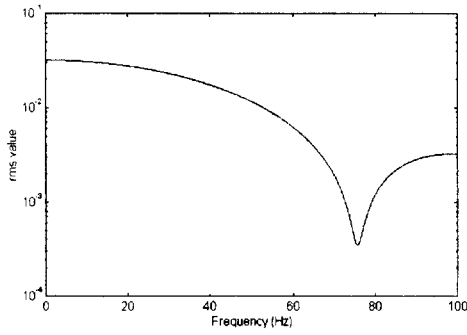


Fig. 2. Autospectrum of ground excitation.

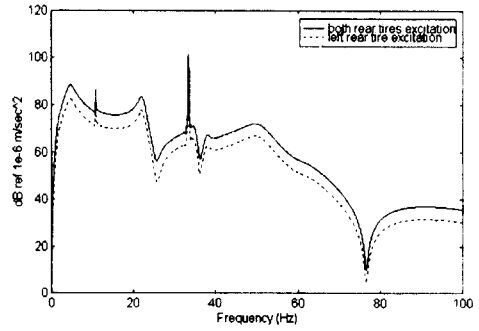


Fig. 3. Autospectra of seat accelerations by rear tire excitations.

Table 1. Natural frequencies and associated modes below 50 Hz

Order	Natural Frequency (Hz)	Mode
1st. peak	4.697	vertical mode of chassis
2nd. peak	10.719	pitching mode of engine
3rd. peak	22.165	pitching mode of cab
4th. peak	35.038	vertical mode of cab
5th. peak	37.847	vertical mode of engine

개발된 시뮬레이션 프로그램을 이용하여 주요 설계 변수가 기관 및 지면 가진에 의한 트랙터 좌석에서의 수직 방향 가속도의 주파수 응답에 미치는 영향을 구명하였다.

(1) 기관의 주요 설계 변수가 좌석 진동에 미치는 영향

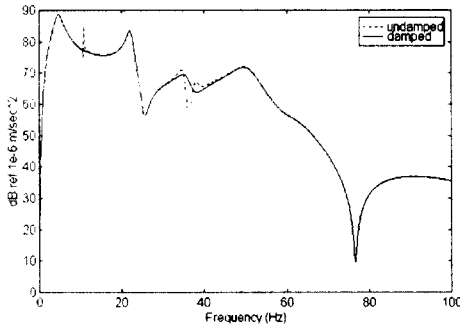


Fig. 4. Autospectra of seat accelerations with and without additional mounting rubber.

기관의 종방향 결합 위치, 결합 폭, 결합 부분의 감쇠 계수가 좌석 진동에 미치는 영향을 분석하였다. 그 결과, 기하학적인 구조 변화의 영향은 상대적으로 적은 반면, 현재 구조에서 기관의 결합 위치에 고무를 방진재로 사용할 때 좌석에서의 기관 가진 주파수는 평균 3.66 dB로 줄일 수 있을 뿐 아니라, 그림 4에서와 같이 10.750 Hz와 38.000 Hz의 공진 주파수의 크기를 줄일 수 있었다.

(2) 차체의 주요 설계 변수가 좌석 진동에 미치는 영향

차체의 질량 중심의 위치, 축거, 운거 그리고 차륜의 공기압에 따른 동적 파라미터의 변화가 좌석 진동에 미치는 영향을 분석하였다. 그 결과, 4.375 Hz 이하의 주파수대에서 후차륜으로부터 차체의 질량 중심의 거리를 현재보다 20 % 증가하였을 때 좌석 진동을

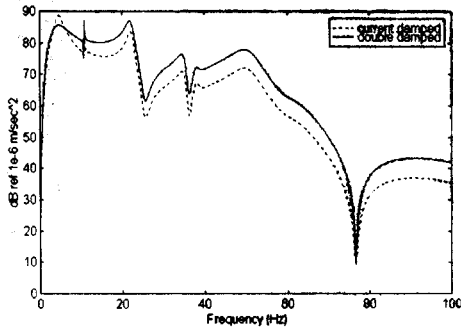


Fig. 5. Autospectra of seat accelerations with additional damper at rear tires.

(3) 캡의 주요 설계 변수가 좌석 진동에 미치는 영향

캡의 질량 중심의 위치, 종방향 결합 위치, 결합 폭 그리고 결합 부분의 강성 계수, 감쇠 계수가 좌석 진동에 미치는 영향을 분석하였다. 그 결과, 캡 현가 장치 결합 위치들의 기하학적 중심으로부터 캡의 질량 중심까지의 거리가 현재보다 20 % 줄어들었을 때 그림 6과 같이 캡의 피칭 방향의 고유 진동수는 높아지고, 캡의 수직 방향 고유 진동수는 낮아진다. 차체의 질량 중심으로부터의 캡 현가 장치 앞부분까지의 거리가 현재보다 20 % 줄어들었을 때 4.750 Hz 이하의 주파수대에서 최고 0.5 dB 정도 줄일 수 있었다. 그러나, 결합 폭의 변화에 대한 영향은 거의 없었다.

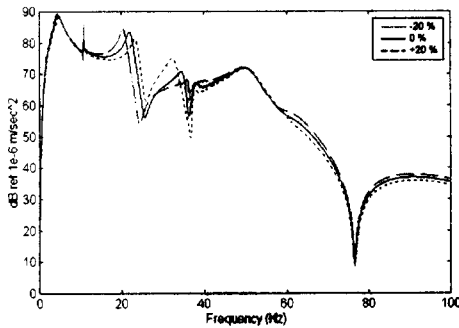


Fig. 6. Autospectra of seat accelerations with varied location of mass center of cab.

최고 0.5 dB 정도 저감할 수 있었다. 그리고, 5.875 Hz 이하의 주파수대에서 축거가 커질수록 좌석 진동은 최고 1.8 dB 정도 줄어들었으나 윤거의 변화에는 민감하지 않았다.

차륜의 공기압에 따른 감쇠 계수의 변화율이 많지 않기 때문에 좌석 진동에 미치는 영향은 적었다. 그래서, 후차륜에 추가적인 감쇠기를 부착하여 예측한 결과 그림 5에서와 같이 인간에게 민감한 주파수인 고유 진동수 4.375 Hz의 크기를 최고 4 dB 정도 줄일 수 있었다.

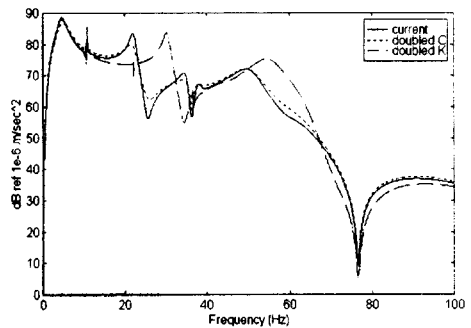


Fig. 7. Autospectra of seat accelerations with varied dynamic parameters of cab mounting materials.

캡 현가 장치의 동적 파라미터는 그림 7과 같이 캡의 수직 방향과 롤링 방향의 고유 진동수를 변화시킨다. 캡 현가 장치의 강성 계수를 낮추면 캡이 피칭 방향의 고유 진동수는 낮추고, 캡의 수직 방향 고유 진동수는 높인다. 기관의 가진 주파수가 20 Hz 이상에 존재하므로 캡 현가 장치의 동적 파라미터를 변화시켰을 때 좌석의 진동은 줄어들 것으로 예상된다. 지면 가인의 주파수대를 정확하게 예측할 수 있다면 캡 현가 장치의 동적 파라미터의 변경 방향을 제시할 수 있을 것이다.

(4) 좌석의 주요 설계 변수가 좌석 진동에 미치는 영향

좌석 현가 장치의 종방향 위치와 동적 파라미터가 좌석 진동에 미치는 영향을 분석하였다. 그 결과, 캡의 질량 중심의 위치에서 좌석 현가 장치의 거리(l_{cs})가 가까워질수록 그림 8과 같이 캡의 피칭 방향과 수직 방향의 고유 진동수를 높이고, 그 크기도 감소시킨다.

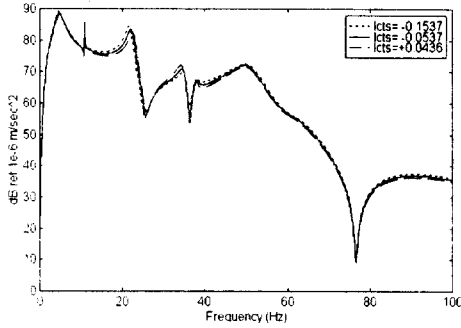


Fig. 8. Autospectra of seat accelerations with varied longitudinal location of seat.

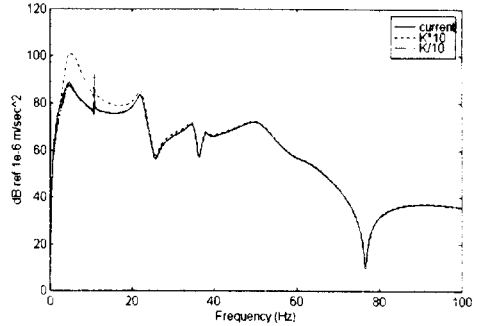


Fig. 9. Autospectra of seat accelerations with varied stiffness coefficient of seat suspension.

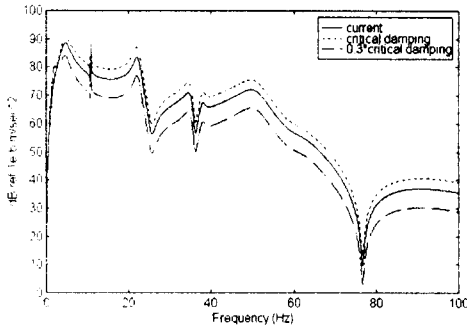


Fig. 10. Autospectra of seat accelerations with varied damping coefficient of seat suspension.

좌석 현가 장치의 강성 계수를 증가시킬수록 그림 9와 같이 좌석 진동은 특히 4-20 Hz의 범위에서 좋지 못한 결과를 보이고 강성 계수를 감소시킬 경우에는 감쇠 계수의 영향 때문에 별로 향상되는 점이 나타나지 않았다. 그래서, 좌석 현가 장치의 최적 감쇠 계수를 시행착오법으로 구한 결과 그림 10에서와 같이 임계 감쇠의 30 % 정도에서 좌석 진동이 가장 많이 감소시킬 수 있는 것으로 나타났다.

4. 요약 및 결론

개발된 동적 모델과 컴퓨터 시뮬레이션 프로그램을 이용하여 다양한 설계 변수들의 변화가 좌석 진동에 미치는 영향을 구명하였다. 그 결과 좌석 진동 저감을 위한 설계 방안을 다음과 같이 제시할 수 있었다.

첫째로, 차체의 수직 방향 고유 진동수 4.697 Hz와 좌석의 수직 방향 고유 진동수 1.807 Hz는 인간이 가장 민감하게 반응하는 주파수이다. 민감도 해석의 결과로 판단할 때, 차체의 수직 방향의 고유 진동수는 트랙터의 후차륜의 감쇠 계수에 가장 민감하게 영향을 받고 좌석의 수직 방향의 고유 진동수는 좌석 현가 장치의 감쇠 계수에 가장 영

향을 많이 받는다. 그 결과, 트랙터 후차륜에 감쇠를 부가하고, 좌석 현가 장치의 감쇠 계수를 임계 감쇠의 30 % 정도로 할 때 좌석 진동을 줄일 수 있는 것으로 나타났다.

둘째로, 현재 기관의 결합 위치에 감쇠 계수가 0.2인 결합 고무를 부가하였을 때, 좌석에서의 기관 가진 주파수의 크기를 평균 3.66 dB 줄일 수 있었으며 기관의 피칭 방향과 수직 방향의 공진 주파수의 크기도 줄일 수 있었다.

셋째로, 동적 모델의 다양한 기하학적인 설계 변수들이 좌석 진동에 미치는 영향을 구명하였다. 그중에서 특히 캡과 좌석에 관계된 설계 변수들이 가장 민감하게 좌석 진동에 영향을 미치는 것으로 나타났다. 캡의 질량 중심의 위치는 캡의 수직 방향과 피칭 방향의 공진 주파수에 민감하게 영향을 미치는 것으로 나타났으나 캡 현가 장치의 종방향 위치와 횡방향 위치는 좌석 진동에 많은 영향을 미치지 못하였다. 또한, 좌석 현가 장치의 종방향 위치는 캡의 롤링 방향과 피칭 방향의 고유 진동수에 영향을 미친다.

본 연구의 결과를 이용하여 설계 단계에서부터 좌석 진동을 고려한 트랙터의 개발에 기여할 수 있을 것으로 판단된다. 로터리나 쟁기 등의 작업기에 의한 좌석 진동의 영향 구명을 위해서는, 개발된 동적 모델에서 트레일러 부분의 모델을 수정하여 사용할 수 있을 것이다.

5. 참고 문헌

1. 김경욱. 1995. 농업용 트랙터 트랜스미션의 부하 특성 해석 기술 및 설계 기술 개발. 동양물산기업(주) 중앙기술연구소.
2. 조춘환. 1996. 진동 감소를 위한 트랙터의 설계에 관한 연구. 석사학위논문. 서울대학교.
3. Kising, A. and H. Goehlich. 1989. Dynamic characteristics of large tyres. *Journal of Agricultural Engineering Research* 43(1):11-21.
4. Laib, L. 1977. Measurement and mathematical analysis of agricultural terrain and road profiles. *Journal of Terramechanics* 14(2): 83-97.
5. Meirovitch, L. 1986. Elements of vibration analysis. McGraw Hill Book Inc., New York.
6. Park, H. J. 1998. Simulation of dynamic characteristics of agricultural tractors. Unpublished Ph.D. Thesis. Seoul National University.