

소형 임내 작업 차량의 안정성 분석

Stability Analysis of Small Loaded Mini-Forwarder

박해권 *

심성보 *

김경욱 *

정희원

H. K. Park

S. B. Shim

K. U. Kim

1. 서론

산림은 인간에게 목재를 제공하고, 환경적인 기능을 수행한다. 그러나 산림은 여러 단계의 유지 관리가 필요하며, 생산 단계에서는 복잡하고 위험한 작업이 요구된다. 특히, 우리나라의 산지는 대부분 지형이 험준하므로 위험한 작업이 불가피하다. 또한, 대부분의 작업이 인력에 의존하고 있기 때문에 기계화의 필요성이 요구된다.

임업 기계의 국산화 일환으로 개발되고 있는 소형 집재용 차량인 소형 임내차(Small Loaded Mini forwarder)는 인력 위주의 간벌 작업을 기계화하기 위한 것으로서, 임목 수확시 벌채한 원목을 벌채 장소에서 임도로 집재하는 기능을 가진 소형 차량이다. 임내 작업 차량은 일반적으로 험악한 지형에서 주행하거나 작업하기 때문에 사고의 위험성이 높다. 사고의 요인에는 불규칙한 노면, 높은 경사로, 각종 장애물 등이 있다. 일반적으로 차량의 안정성에는 조종성, 종안정성, 횡안정성이 있다. 조종성 상실은 차륜에 작용하는 토양 반력이 조향하는데 필요한 최소한의 수직력보다 작을 때 일어나며 (김경욱, 1993), 종안정성은 차량의 견인 부하가 크거나 급출발 시 발생할 수 있는 후방 전도에 대한 안정성이다. 횡안정성은 차량이 장애물에 의하여 선회할 때 원심력에 의하여 발생하는 측면 전도 또는, 경사지를 주행할 때 장애물에 의하여 발생하는 측면 전도에 대한 안정성이다. 험한 지형을 주행하는 차량의 전도 사고는 대부분 횡안정성의 상실 때문에 일어난다.

본 연구는 현재 국내에서 개발되고 있는 소형 임내 작업 차량의 안정성을 평가하기 위하여 시도되었으며, 시작기를 기본으로 시뮬레이션 모델을 개발하고, 시뮬레이션을 통하여 동적으로 안정성이 높은 차량을 개발하는데 있다. 또한, 이를 이용하여 임내 작업차의 안전 주행 영역을 구명하고자 하였다.

* 서울대학교 농업생명과학대학 바이오시스템공학 전공

2. 재료 및 방법

가. 시험 임내 작업 차량

본 연구에서 연구 대상으로 한 임내 작업 차량 시작기의 구조는 그림 1과 같다. 작업은 주로 1인이 할 수 있으며 2 m 이하의 좁은 노면을 주행할 수 있는 궤도형 차량이다.

Table 1 Specifications of small loaded mini-forwarder

Components	Specifications
Engine	Air-cooled, single cylinder
	Disel Engine
	Rated power/rpm : 10 PS / 2,200 rpm
Running Gear	Crawler Type
	Max. Speed : 5.5 Km/h
	Climbable slope : 25° Min. turning radius : 3 m
Loading capacity	9,800 N
Winch	Drum size : 10 mm × 80 mm
	Pull power : 4,900 ~ 6,860 N
	Max. Pull speed : 40 m/min
Overall size	2,000 × 1,000 × 1,500 mm
Weight	11,123 N

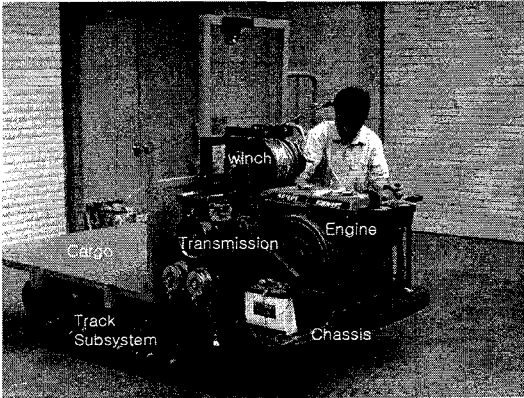


Fig. 1 A view of mini-forwarder under study.

표 1에서와 같이 기관의 최대 출력은 10마력이고 적재 중량은 1 ton 내외이다. 궤도 시스템은 일반적인 저속용 궤도 시스템으로서 스프라켓의 열 수가 한 줄이다. 그림 1에서와 같이 궤도 차량은 트랙부(Track)와 샤시부(Chassis)로 구성되어 있다. 샤시부에는 엔진, 윈치, 변속 장치 등이 장착되어 있고, 원목을 적재할 수 있는 적재함이 있다.

나. 동적 시뮬레이션 모델

개발된 소형 임내 작업 차량의 모형 궤도부의 오른쪽 스프라켓의 무게 중심을 원점으로 하여 차량의 후진 방향을 + x 축, 연직 방향을 + y 축, 작업 차량의 전진 방향에 대하여 왼쪽을 + z 축 방향으로 하였다.

다. 무게 중심의 검증

시작기의 무게 중심 좌표(x_c , y_c , z_c)를 결정하기 위하여 3가지 실험을 실시하였다. x_c 는 평탄한 철판 위에 임내 작업 차량을 수평으로 올려놓고, 일정한 거리 D_x 만큼 떨어진 궤도부의 2지점에서 지면 반력을 결정하여 식 (1)로써 구하였다. 이때 철판에 의한 영향을 배제하기 위하여 철판만을 올려 놓은 상태에서 로드셀을 0점 조정하여 임내 작업 차량의 지면 반력을 측정하였다.

$$x_c = D_a - \frac{D_x F}{W} \quad (1)$$

위의 x_c 를 구하는 것과 같은 원리로 y_c, z_c 를 구하였다.

라. 질량관성모멘트의 검증

질량관성모멘트는 진자 운동의 주기를 측정하여 계산하는 현수 측정법(pendulum method)을 이용하여 구하였다.

마. 주행 검증 시험

개발된 임내 작업 차의 실제 거동과 같은 조건에서 시뮬레이션 모델로써 예측한 거동을 비교하여 시뮬레이션 모델의 유효성을 평가하였다. 주행 실험에서 수직 방향 가속도를 측정하였다. 샤시(chassis)부의 적재함에 1축 가속도계를 부착하여 상하 진동을 측정하였다. 센서로부터 얻어지는 데이터는 정확한 시간과 위치를 측정하여 시뮬레이션과 같은 상황을 만들었다.

3. 결과 및 분석

가. 무게 중심의 검증

표 2는 실제 측정된 임내 작업 차량의 무게 중심과 모형으로 시뮬레이션한 무게 중심의 좌표를 비교하여 나타낸 것이다. 시뮬레이션으로 구한 각 좌표의 % 오차는 식 (2)를 이용하여 구하였다. 오차는 각각 3.44 %, 3.80 %, 2.92 %로서 이는 모형의 유효성을 인정할 수 있는 범위의 오차로 판단되었다.

$$Error\% = \frac{\text{측정값} - \text{예측값}}{\text{측정값}} \times 100 \quad (2)$$

Table 2 Percentage error of model in terms of coordinates of mass center.

Coordinates of mass center	Simulated	Measured	Error %
x, mm	269.10	260.15	3.44
y, mm	244.79	235.82	3.80
z, mm	492.78	478.79	2.92

Table 3 Comparison between simulation and experiment data of inertia moment.

Mass Inertia Moment	Simulated	Measured	% Error
Ixx, kg · m ²	367.45	354.33	3.7
Iyy, kg · m ²	808.62	823.47	1.84
Izz, kg · m ²	740.94	801.79	6.10

나. 질량관성모멘트의 검증

무게 중심을 기준으로 각 축에 대한 진자 운동의 평균 주기를 이용하여 구한 각 축에 관한 질량관성모멘트는 표 3에서와 같다. 임내 작업 차량 모형으로 예측한 x, y, z 축에 대한 질량관성모멘트와 각각 실험으로 결정한 질량관성 모멘트에 대한 예측치의 % 오차는 각각 3.7 %, 1.84 %, 6.1 %이었다.

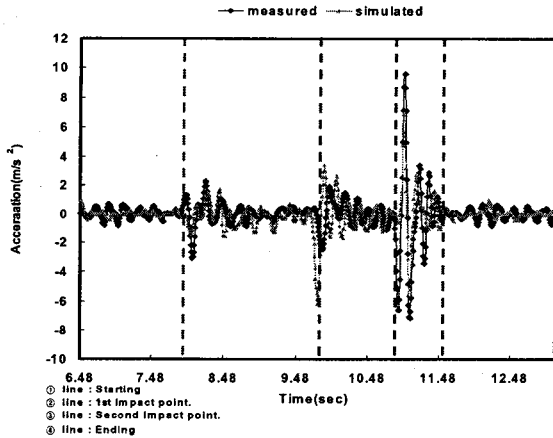


Fig. 2 Comparing simulation and experiment data.

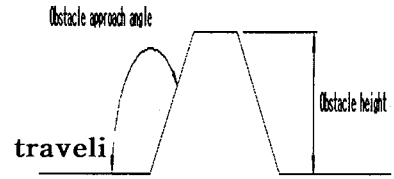


Fig. 3 Approach angle and height of obstacle.

다. 주행검증시험

그림 2는 범프를 통과할 때 시뮬레이션한 수직 방향 가속도를 측정값과 비교하여 나타낸 것이다. 러그와 범퍼가 충돌할 때 3개의 가속도 피크가 나타났다. 시뮬레이션한 각 피크 가속도의 주파수와 크기는 실험 치와 비교적 잘 일치하였으며, 측정 데이터의 RMS는 1.32이었고, 시뮬레이션 데이터의 RMS값은 1.22로서 % Error는 약 7.58 이었다.

라. 주행 안정 영역 결정

회전도가 일어나기 쉬운 경우는 임내 차량이 등고선 방향으로 주행할 때 경사 위쪽의 스프라켓 부위가 장애물과 충돌하는 경우이다. 회전도 시뮬레이션 프로그램에 임내 작업 차량의 설계 조건으로서 무게 중심의 위치와 각 스프라켓 사이의 거리, 주행 조건으로서 주행 속도, 지면 경사각, 장애물의 길이와 높이를 입력하고, 주행 방향에 따른 임내 작업 차량의 회전도 한계 영역을 예측하였다. 지면은 RecurDyn 5.21 version(FunctionBay)을 이용하여 3차원으로 모델링하고 시뮬레이션을 통하여 지면의 경사도에 따라 안정성을 평가하였다.

차량이 장애물을 통과할 때 차량의 운동에 가장 큰 영향을 미치는 장애물의 변수는 장애물의 높이와 접근각이다. 그림 3은 장애물의 높이와 접근각을 나타낸 것이다.

장애물의 높이는 75 mm, 접근각은 135°로 하였다. 주행 속도는 일반적인 작업 속도인 4 km/h로 하였다. 우리나라 산악 지대의 토양을 사양토로 정의하고 각각의 물성치를 정의하였다.(Wong, 2001)

임내 작업 차량의 안전 영역을 구명하기 위하여 0°를 기준으로 15° 간격으로 주행 시뮬레이션을 실시하였다. 각 주행 방향에서 작업 차량이 전도되는 지면의 기울기를 구하였다. 각 주행 방향에 대한 범프의 위치는 차량의 진행 방향과 90°가 되도록 고정하여 동일한 조건을 유지하였다.

적재량은 7.8 kN과 9.75 kN의 두 가지로 실시하였으며 주행시 안정·불안정 여부는 다음 세 가지를 기준으로 결정하였다.

1. 범프를 통과할 때 전도가 되는 경우
2. 차량이 미끄러져 주행이 불가능한 경우
3. 하중으로 인하여 케도가 스프라켓을 벗어나는 경우

그림 4에서 방사 방향은 임내 작업 차량의 주행 방향(θ)을 나타내며, 동심원의 크기는 지면의 경사도(ϕ)를 나타낸다. 횡전도 한계 경사각을 연결한 내부 영역은 횡전도가 일어나지 않는 안정 영역이 되며, 외부 영역은 횡전도가 일어날 가능성이 있는 불안정 영역이 된다. 후면 적재 방식은 대체로 길이가 1.8 m 목재를 적재하는 것이 타당한 것으로 나타났다. 그림 4는 지름이 18 cm이고 길이가 1.8 m인 목재를 7.8 kN 적재하였을 때의 안전 영역을 나타낸 것이다. 차량이 전체적으로 좌·우 전·후 대칭이 되도록 목재를 적재하여 주행 안전 영역이 좌·우 전·후 대칭의 모양을 나타내고 있다. 주행 방향이 0°일 때 한계 경사각은 22.5°이고 90°일 때는 37.5°로 나타났다. 대체로 주행 방향이 60°~120°와 240°~300°일 때 안정성이 높은 것으로 나타났다. 그림 5는 주행 방향 90°에서의 측방 전도되는 모습을 나타낸 것이다.

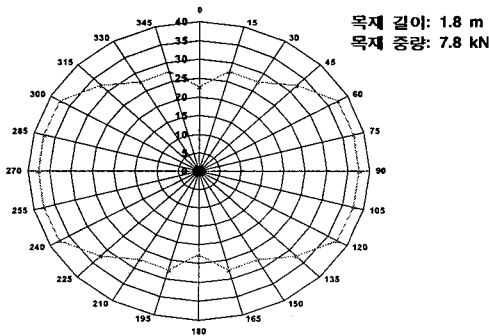


Fig. 4 Safe region of rear-loaded mini-forwarder against sideways overturning.

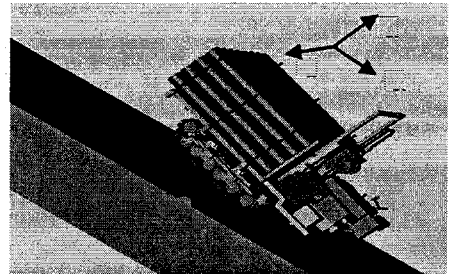


Fig. 5 Critical slope angle of rear loaded mini-forwarder in $\theta=90^\circ$.

4. 요약 및 결론

본 연구에서는 임내 작업 차량의 적재 방식과 적재량에 따른 안정성을 분석하였고 차량이 안전하게 주행할 수 있는 횡 전도에 대한 안전 영역을 제시하였다.

본 연구의 주요 결론은 다음과 같다.

1. 임내 작업 차량의 동적 시뮬레이션 모델을 개발하였고, 모델의 유효성을 무게 중심, 질량 관성모멘트, 주행 시험을 통하여 검증하였다.
2. 주행 범프를 통과할 때 안정성을 상실하는 경우는 다음과 같다.
 - 가. 범프를 통과할 때 전도가 되는 경우
 - 나. 차량이 미끄러져 주행이 불가능한 경우

- 다. 하중으로 인하여 궤도가 스프라켓을 벗어나는 경우
3. 주행 방향과 지면 경사도를 변수로 하여 임내 작업 차량의 횡전도 한계 영역을 예측하였다.
 4. 후면 적재 모델에서 1.8 m의 단재를 적재하였을 때 대체로 주행 방향이 60°~120°와 240°~300°일 때 안정성이 높은 것으로 나타났고, 3.6 m 측면 적재 방식에서는 주행 방향이 0°일 때 횡 전도각은 25°이고 90°일 때는 37.5°이었다.

5. 참고 문헌

1. 김경욱. 1999. 농업용 트랙터의 안정성 분석 최종 보고서. 서울대학교 대학원 농공학과.
2. 박현기. 2002. 다물체 동력학 해석 프로그램을 이용한 포워더의 횡전도 분석. 한국농업기계학회지. 27(3).
3. 신장호, 최진환, 이승중. 1996. 접촉력을 고려한 궤도차량의 동적 모델링. 한국자동차공학회 96년도 추계학술대회.
4. 정주상, 정우담. 1995. 급경사지 산림 작업을 위한 차량의 역학 분석에 관한 연구. 한국임학회지 84(2): 218-225.
5. 정창주, 류관희, 김경욱. 1992. 농업동력학. 문운당.
6. Bando, K., Yoshida, K., and Hori, K. 1991. The Development of the rubber track for small size bulldozers. International off-Highway Powerplants Congress and Exposition, Milwaukee, WI, Sept. 9-12.
7. Choi, J. H. 1996. Use of recursive and approximation methods for dynamic analysis of spatial tracked vehicles. Ph. D. Thesis, University of Illinois at Chicago. USA.
8. Kim, K. U. and H. J. Park. 1993. Modeling static stability of agricultural tractors. International Conference for Agricultural Machinery and Process Engineering. October 19-22, 1993, KOEX, Seoul, Korea. Vol IV: 1127-1136.
9. Nabo, A. and Y. Yamada 1992. Accident analysis and capability to surmount obstacles of side-loaded mini-forwarders. Journal of Japanese Forest Society. 74(1): 9-17.
10. Shabana A. 1989. Dynamics of multibody systems. John Wiley & Sons, New York.