

컴퓨터 시뮬레이션을 이용한 소형 임내차 시작기의 장애물 통과 및 적재 안정성 평가

박해권 김경욱 심성보 김재원 박문섭 송태영

Stability Evaluation of Bump Crossing and Loading of Proto-type Mini-Forwarder by Computer Simulation

H. K. Park K. U. Kim S. B. Shim J. W. Kim M. S. Park T. Y. Song

Abstract

The objective of this study was to evaluate the bump crossing and loading stability of a proto-type mini-forwarder under development. The evaluation was performed by computer simulation using a multi-body dynamic analysis program, Recur-Dyn 5.21. The proto-type was modeled and its properties such as mass, mass center, and mass moment of inertia were determined using 3D CAD modeler, Solid Edge 8.0. The % errors of masses, mass center, mass moment of inertia, and vertical motion of the model were within less than 10% and the model's behavior agreed relatively well with those of the proto-type when traversing over a rectangular bump. Using the validated model, bump crossing of the proto-type was simulated and the loading limit was determined. It was found that effects of the shapes of bump on the bump crossing performance was insignificant within the practical heights of bumps. Stability of bump crossing increased with loading. However, loading of longer logs than 2.7 m made the crossing unstable because the ends of logs contacted ground when traversing over the bump. The maximum loading capacity of the proto-type was estimated to be 7.8 kN of 2.7 m long logs.

Keywords : Mini-forwarder, Computer simulation, Stability evaluation

1. 서론

우리 나라는 전 국토의 약 70%가 산림으로 되어 있다. 산림은 인간에게 목재를 제공할 뿐만 아니라 토사 유출 방지, 대기 정화, 자연 경관 유지 등 환경 보존의 기능을 수행한다. 그러나 산림의 기능을 제대로 유지하기 위해서는 적절한 관리 작업이 요구된다. 우리 나라의 산지는 대부분 지형이 험준하고, 또한 대부분의 관리 작업이 인력에 의존하고 있기 때문에 보다 안전하고 효율적인 작업을 수행하기 위해서는 임업 기계화가 절대적으로 필요하다. 특히, 목재 수확 작업에서는 여러 단계의 힘들고 위험한 작업이 요구되기 때문에 하베스터

(harvester), 포워더(forwarder), 프로세서(processor), 타워 야드(tower yard) 등 다양한 임업 기계가 필수적이다(Nabo, 1992).

임업 기계의 국산화 일환으로 개발되고 있는 소형 집재 운반용 차량인 소형 임내차(mini-forwarder)는 인력 위주의 개별 작업을 기계화하기 위한 것으로서, 별도의 원목을 별도 장소에서 임도까지 운반 집재하는 기능을 가진 소형 차량이다. 임내차는 일반적으로 험한 지형에서 주행하거나 작업하기 때문에 사고의 위험성이 매우 높다. 불규칙한 노면, 높은 경사, 각종 장애물 등이 주요 사고의 요인으로 지적되고 있다. 따라서, 이러한 조건에서 사용되는 임내차는 높은 안정성이 요구된다.

This article was submitted for publication in April 2005, reviewed and approved for publication by the editorial board of KSAM in October 2005. The authors are H. K. Park, S. B. Shim, Graduate Student and K. U. Kim, KSAM member, Professor at the Seoul National University, J. W. Kim, M. S. Park and T. Y. Song at the Korea Forest Research Institute. The corresponding author is K. U. Kim, Professor, Dept. of Biosystems and Biomaterial Science and Engineering, Seoul National University, 151-742, Seoul Korea; Fax : +82-2-873-2049; E-mail : <kukim@snu.ac.kr>

일반적으로 차량의 안정성에는 조종성 상실, 종안정성, 횡안정성이 있다. 조종성 상실은 조향륜에 작용하는 토양 반력이 조향하는 데 필요한 최소한의 수직력보다 작을 때 일어나며(정 등, 1992), 종안정성은 차량의 견인 부하가 크거나 급출발 시 발생할 수 있는 후방 전도에 대한 안정성이다. 횡안정성은 차량이 선회할 때 원심력에 의하여 발생하는 측방 전도 또는 경사 위쪽의 장애물을 통과할 때 일어나는 측방 전도에 대한 안정성이다. 험한 지형을 주행하는 차량의 사고는 대부분 장애물을 통과할 때 일어나는 전도 사고로서 차량을 개발할 때는 이에 대한 안정성 평가가 요구된다.

본 연구는 현재 국내에서 개발되고 있는 소형 임내차의 장애물 통과 및 적재 안정성을 평가하기 위한 것으로서, 동적 모델을 이용한 시작기의 안정성 평가 가능성을 제시하고, 컴퓨터 시뮬레이션 기법을 적용하여 목재 적재 시 시작기의 장애물 통과 여부와 안전 적재량을 구명하고자 하였다.

2. 재료 및 방법

가. 소형 임내차

본 연구에서 안정성 평가 대상으로 한 임내차의 시작기는 그림 1에서와 같다. 임내차는 기관, 변속부, 윈치, 적재함, 궤도 주행 장치로 구성되어 있으며, 폭이 2 m 이하인 좁은 입도를 주행할 수 있도록 농업용 궤도형 스피드 스프레이어를 개조하여 설계한 궤도 차량이다.

기관의 최대 출력은 7.46 kW이고 최대 적재 중량은 9.8 kN이다. 궤도 장치는 저속용 일반 궤도 장치로서 전륜이 6개인 고무 궤도이다. 표 1은 임내차 시작기의 주요 제원을 나타낸 것이다.

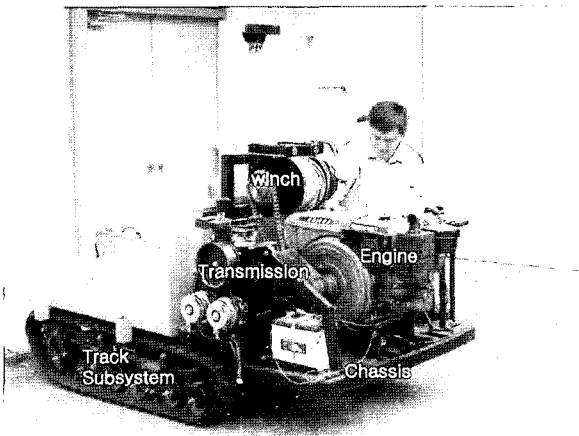


Fig. 1 A view of proto-type mini-forwarder.

Table 1 Specifications of proto-type mini-forwarder

Components	Specifications
Engine	Air-cooled, single cylinder Diesel engine
	Rated power/rpm : 7.46 kW / 2,200 rpm
Running Gear	Crawler type : Rubber track with 6 road wheels
	Max. speed : 5.5 km/h
	Climbable slope : 25° Min. turning radius : 3 m
Loading capacity	9.8 kN
Winch	Drum size : 10 mm×80 m
	Pull : 4,900~6,860 N
	Max. pull speed : 40 m/min
Overall size	2(L)×1(W)×1.5(H) m
Weight	11.1 kN

나. 임내차의 동적 모형

시작기의 동적 모형은 임내차를 크게 차체부, 궤도부, 엔진부, 윈치부, 변속부로 구분하고 각 부분을 모형화한 후 이를 결합하는 방법으로 개발하였다. 차체부는 다시 메인 프레임, 하부 프레임, 적재함으로 구성하였으며, 좌우 궤도부는 47개의 궤도 링크, 6개의 로드 휠, 1개의 지지 롤러, 1개의 스프로킷으로 구성하였다. 각 모형은 실제 도면을 이용하여 실물의 형상대로 작성하였으며, 모형화를 위한 프로그램은 Solid Edge V8.0(UGS, 2000)을 이용하였다. 모형에 사용된 강재와 고무의 밀도는 각각 7800 kg/m³, 1.13 kg/m³로 하였다. 그림 2와 3은 각각 위의 방법으로 개발한 차체부, 궤도부, 엔진부, 윈치부, 변속부의 모형과 이를 결합한 임내차의 모형을 나타낸 것이다.

다. 모형의 검증

모형에 대한 검증은 각 구성 부분에 대한 검증과 구성 부분을 조립한 전체 임내차 시작기에 대한 검증으로 구분하여 실시하였다. 각 구성 부분은 실제의 중량과 모형의 중량을 비교하여 검증하였으며, 전체 임내차는 시작기의 중량, 무게 중심의 위치, 범퍼를 통과할 때 무게 중심의 수직 가속도를 측정하여 모형으로 시뮬레이션한 결과와 비교하였다.

1) 구성 부분의 모형 검증

표 2는 임내차를 구성하는 각 부분에 대한 실제 중량과 모형으로 예측한 중량을 비교하여 나타낸 것이다. 모형의 % 오차는 궤도 부분에서 가장 크게 나타났으나, 전체적으로 % 오차 범위는 1.1% 정도로서 모형의 유효성을 인정하는 데 무리가 없는 것으로 판단되었다.

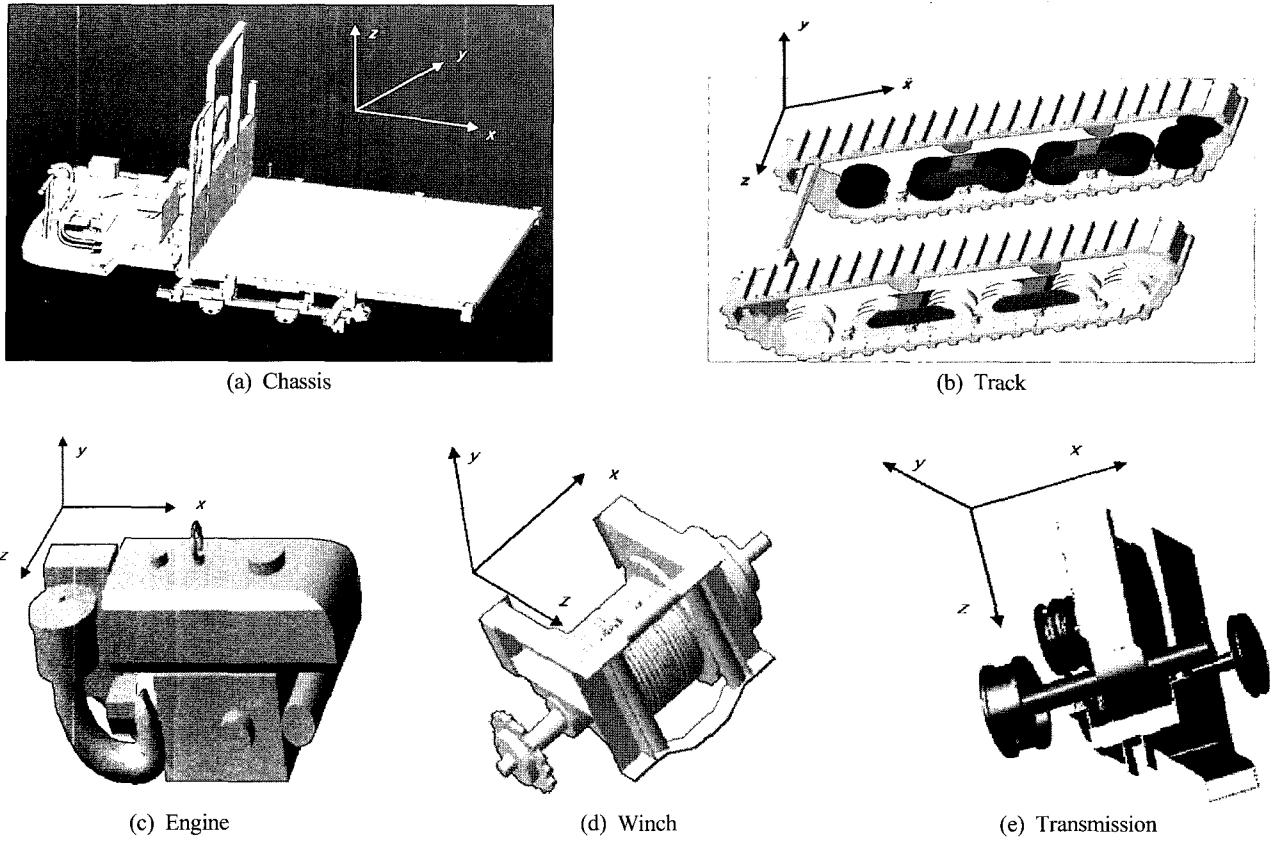


Fig. 2 Solid models of mini-forwarder components.

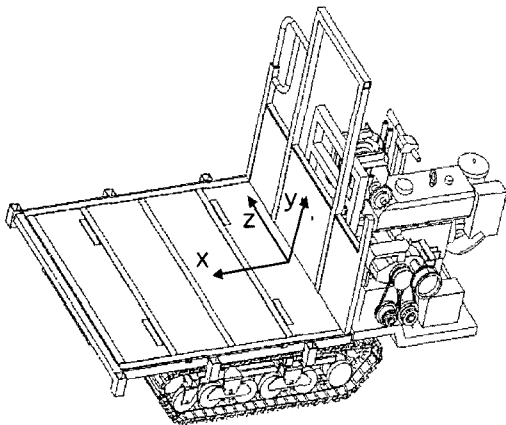


Fig. 3 Solid model of mini-forwarder assembly.

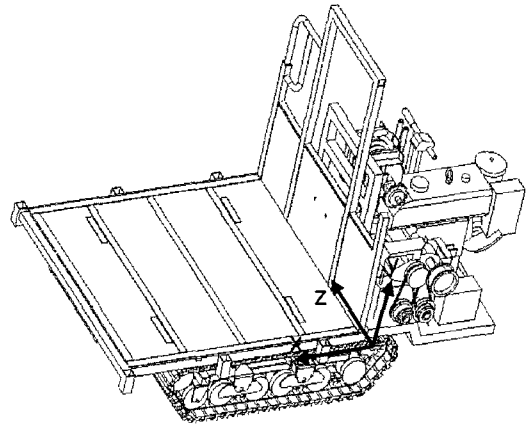


Fig. 4 Coordinate system of loaded mini-forwarder for determination of mass center.

Table 2 Comparison of component weights

Component	Proto-type	Model	% Error
Chassis (N)	2495.0	2535.6	1.6
Track (N)	3602.0	3463.0	3.9
Engine (N)	1381.2	1378.3	0.2
T/M (N)	929.3	931.9	0.3
Winch (N)	744.8	740.2	0.6

2) 임내차 시작기의 모형 검증

임내차 시작기의 무게 중심을 결정하기 위하여 그림 4에서와 같이 궤도부의 우측 스프라켓 중심을 원점으로 한 기준 좌표계를 설정하였다. 즉 차량의 후진 방향을 +x축, 연직 상향을 +y축, 전진 방향에 대하여 좌측을 +z축으로 한 기준 좌표계를 설정하였다.

무게 중심의 x, y, z 좌표는 그림 5에서와 같이 KS 방법 (KS, 2001)에 따라 실험을 통하여 결정하였다. 표 3은 실측한 시작기의 무게 중심과 시뮬레이션한 모형의 무게 중심 좌표를 비교하여 나타낸 것이다. 모형에서 구한 x, y, z 좌표의 % 오차는 각각 3.3%, 3.7%, 2.8%로서 이는 모형의 유효성을 인정할 수 있는 범위인 것으로 판단되었다.

무게 중심을 기준으로 한 x, y, z축에 대한 시작기의 질량관성모멘트는 그림 6에서와 같이 현수 측정법을 이용하여 결정하였다. 질량관성모멘트를 결정하기 위한 기준 좌표계는 무게 중심을 결정할 때와 달리 그림 3에서와 같이 무게 중심을 원점으로 하여 시작기의 후방을 +x축, 연직 상방을 +y축, 전진 방향에 대하여 왼쪽 방향을 +z축으로 하였다.

표 4는 실측으로 결정한 시작기의 질량관성모멘트와 모형에서 구한 질량관성모멘트를 비교하여 나타낸 것이다. 모형으로 결정한 x, y, z축에 대한 질량관성모멘트의 % 오차는 각각 3.6%, 1.8%, 8.2%이었다.

동적 검증은 시작기가 평탄한 지면에서 일정한 높이와 형상의 범퍼를 통과할 때 무게 중심에서 측정된 y 방향의 수직

Table 3 Mass center coordinates of proto-type mini-forwarder and its model

Coordinates	Proto-type	Model	% Error
x (mm)	260.2	269.1	3.3
y (mm)	235.8	244.8	3.7
z (mm)	478.8	492.8	2.8

Table 4 Mass moment of inertia of proto-type and its model

Mass Inertia Moment	Proto-type	Model	% Error
Ixx (kg · m ²)	354.3	367.5	3.6
Iyy (kg · m ²)	823.5	808.6	1.8
Izz (kg · m ²)	801.8	740.9	8.2

가속도와 같은 조건에서 모형으로 예측한 y 방향의 수직 가속도를 비교하는 방법으로 실시하였다. 무게 중심의 y 방향 가속도는 1축 가속도계를 무게 중심의 위치에서 y 방향으로 설치하여 측정하였다. 범퍼는 그림 7에서와 같이 높이가 44 mm이고 폭이 195 mm인 직사각형 각목으로서 시작기의 진행 방향과 직각으로 노면에 고정하였다. 그림 8은 시작기가

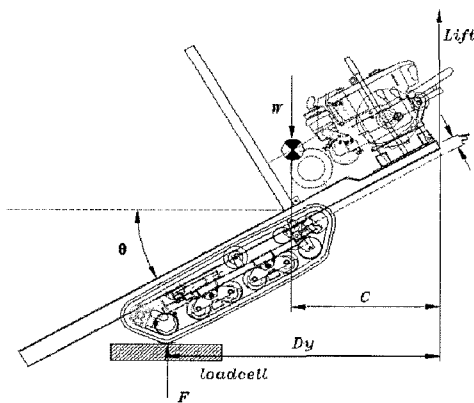


Fig. 5 Determination of mass center of mini-forwarder in y-axis direction.

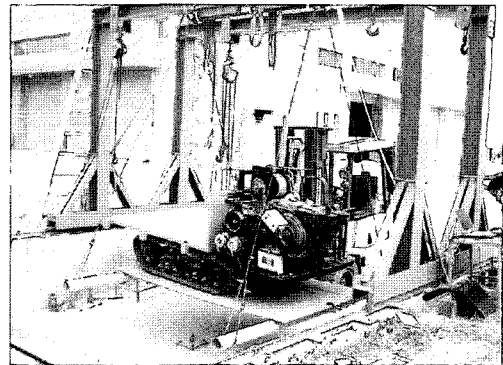


Fig. 6 Determination of mass moment of inertia about x axis by suspension method.

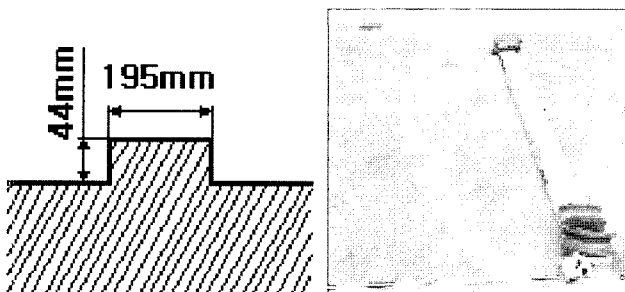


Fig. 7 A rectangular bump used for model validation.

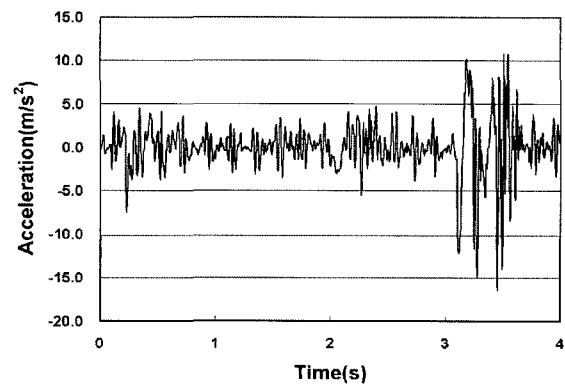


Fig. 8 Measured vertical acceleration of the proto type when traversing over a 44×195 mm rectangular bump with a forward velocity of 0.36 m/s.

0.36 m/s의 속도로 범퍼를 통과할 때 측정된 무게 중심의 y 방향 가속도를 나타낸 것이다. 범퍼를 지날 때의 가속도가 범퍼에 도달하기 전의 가속도보다 크게 나타났다. 같은 조건에서 모형으로 시뮬레이션한 시작기의 거동은 그림 9와 같고, 수직 방향 가속도는 그림 10에서와 같이 나타났다. 궤도가 범퍼와 충돌할 때 3개의 가속도 피크가 나타났으며, 이는 시뮬레이션한 피크 가속도의 크기 및 주파수와 비교적 잘 일치하였다. 즉, 측정된 3개 피크 가속도의 rms 값은 1.32 m/s^2 이었으며, 시뮬레이션한 가속도의 rms 값은 1.22 m/s^2 으로서 시뮬레이션의 % 오차는 7.6%이었다.

이상의 검증 결과로부터 구성 부분 및 시작기 모형의 % 오차는 10% 이내이었고, 실제 주행 상태와 모형의 주행 상태는 비교적 잘 일치하였으므로, 시작기의 범퍼 통과 및 적재 안정성을 평가하는 데는 충분한 것으로 판단하였다.

라. 적재 목재의 모형화

시작기의 적재함은 길이가 1.8 m, 폭이 1.5 m, 높이가 0.7 m

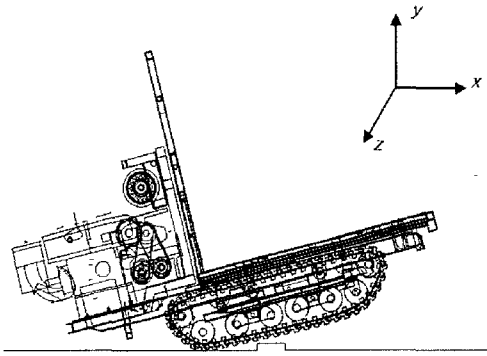


Fig. 9 Simulated motion of the proto-type when traversing over a 44×195 mm rect-angular bump with a forward velocity of 0.36 m/s.

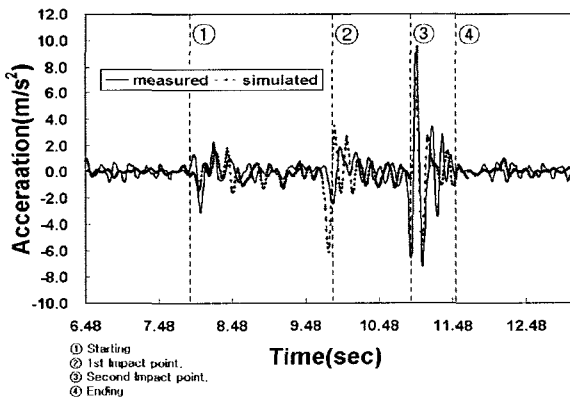


Fig. 10 Comparison of measured and simulated vertical accelerations of the proto-type when traversing over a 44×195 mm rectangular bump with a forward velocity of 0.36 m/s.

로서, 적재 체적은 약 2 m^3 정도이다. 그러나 실제 적재가 가능한 체적은 적재 높이를 고려하여 약 4 m^3 으로 하였다. 또한 산지에서 벌목되는 원목은 지름이 20~25 cm, 길이가 180~360 cm 정도이다. 따라서 적재 목재의 모형은 원목의 모양, 길이, 적재함의 크기 등을 고려하여 그림 11에서와 같이 지름은 모두 18 cm로 하였고, 길이는 1.8, 2.7, 3.6 m 3종류로 하였다. 적재 형태는 원목을 1단에 8개씩 최대 4단까지 적재할 수 있도록 하였다. 실제, 원목은 절두체 형상이나 모형화의 편의상 지름이 일정한 원기둥으로 하였으며, 목재의 밀도는 520 kg/m^3 으로 균일하게 하였다. 목재의 지름이 18 cm이고 길이가 1.8 m인 경우 4단으로 적재하였을 때 목재의 총무게는 7.8 kN이고, 길이 2.7 m인 경우에는 11.7 kN, 3.6 m인 경우에는 15.6 kN이다.

마. 시뮬레이션

유효성을 입증한 임내차 시작기의 모형을 이용하여 임내차가 범퍼를 통과할 때 적재함 중심의 수직 운동 상태와 적재 목재의 지면 접촉 여부를 시뮬레이션하였다. 시뮬레이션은 상용화된 프로그램 RecurDyn(Functionbay, 2003)을 이용하여 표 5에서와 같이 6조건에서 실시하였으며, 임내차는 사양 토에서 1 m/s의 속도로 직진 주행하는 것으로 가정하였다.

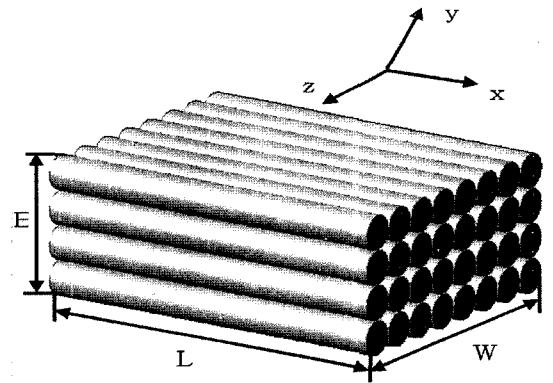


Fig. 11 Log model.

Table 5 Simulation conditions

Condition	Bump type mm	Lug length m	Lug stacks	Forward speed m/s
1	□ 44×195	1.8	0	1
2	□ 44×195	1.8	4	1
3	○ 150	2.7	1	1
4	○ 150	2.7	2	1
5	○ 150	2.7	3	1
6	○ 150	2.7	4	1

3. 결과 및 고찰

그림 12는 길이가 1.8 m인 목재를 4단으로 적재한 상태와 목재를 적재하지 않은 상태에서 시작기가 단면이 44×195 mm 인 사각 범퍼를 통과할 때 적재함 중심의 수직 변위, 수직 속도, 수직 가속도를 시뮬레이션한 결과이다. 범퍼 통과 시 목재를 적재하였을 때 지면을 기준으로 한 피크 변위, 피크 속도, 피크 가속도는 각각 84 cm, 0.1 m/s, 2 m/s² 수준으로서 목재를 적재하지 않았을 때의 86 cm, 0.15 m/s, 6 m/s²보다 낮았다. 즉, 목재를 적재하였을 때가 적재하지 않았을 때보다 범퍼 통과 시 안정성이 증가된 것으로 나타났다. 이는 장애물을 통과할 때 궤도의 접지 면적이 비적재 상태일 때보다 적재 상태일 때 더 크기 때문인 것으로 판단된다. 즉, 목재를 적재함에 따라 적재 하중에 의하여 궤도에 작용하는 지면 반력이 증가하고, 지면의 침하가 증가되어 접지 면적을 증가시키기 때문인 것으로 판단된다. 또한 적재 중량의 증가는 임내차의 관성을 증가시켜 저속에서 범퍼에 의한 수직 진동을 흡수할 수 있는 능력을 증가시키기 때문인 것으로 판단된다.

시작기는 무게 중심이 차체의 앞쪽에 있었기 때문에 전후방 전도에 대한 안정성이 낮았다. 그러나 목재를 적재한 후에는 상대적으로 무게 중심이 차체의 후방으로 이동하여 전후방 전도에 대한 위험성은 오히려 감소되는 것으로 나타났다.

그림 13은 시작기가 2.7 m 길이의 목재를 4단으로 적재하고 높이가 150 mm인 반원형 범퍼를 통과할 때의 모습을 시뮬레이션한 것이다.

목재의 길이가 2.7 m이면 시작기의 무게 중심이 후방으로 이동하기 때문에 그림 13의 (b)에서와 같이 범퍼를 통과할 때 목재의 후방 끝 부분이 지면에 닿고 차량의 앞부분은 들리게 된다. 특히, 내리막 경사지의 경우에는 범퍼를 통과한 후 앞부분이 다시 아래로 내려와 지면과 충돌할 때는 차체가 파손될 위험이 있는 것으로 나타났다. 따라서 길이가 긴 목재를 적재하면 무게 중심이 더욱 후방으로 이동하기 때문에 길이가 2.7 m와 3.6 m인 장재는 적재가 불가능한 것으로 판단되었다. 즉, 시작기는 안전상 길이가 2.7 m 이상인 목재는 적재할 수 없는 것으로 판단된다.

그림 14는 길이가 2.7 m인 목재를 후면 적재한 상태에서 높이가 150 mm인 반원형 범퍼를 통과할 때 적재함 중심의 수직 변위, 속도, 가속도를 시뮬레이션한 결과이다. 지면을 기준으로 한 무게 중심의 피크 변위, 피크 속도, 피크 가속도는 각각 110 cm, 0.3 m/s, 8 m/s²으로서 사각 범퍼를 통과할 때보다 높았다. 즉, 범퍼의 높이가 높아짐에 따라 수직 변위, 속도, 가속도의 크기도 증가되었다. 그림 12와 그림 14의 변위, 속도, 가속도 반응을 이용하여 사각 범퍼와 반원 범퍼가 시작기의 운동에 미치는 영향을 고찰하였으나 그 반응에는 큰 차

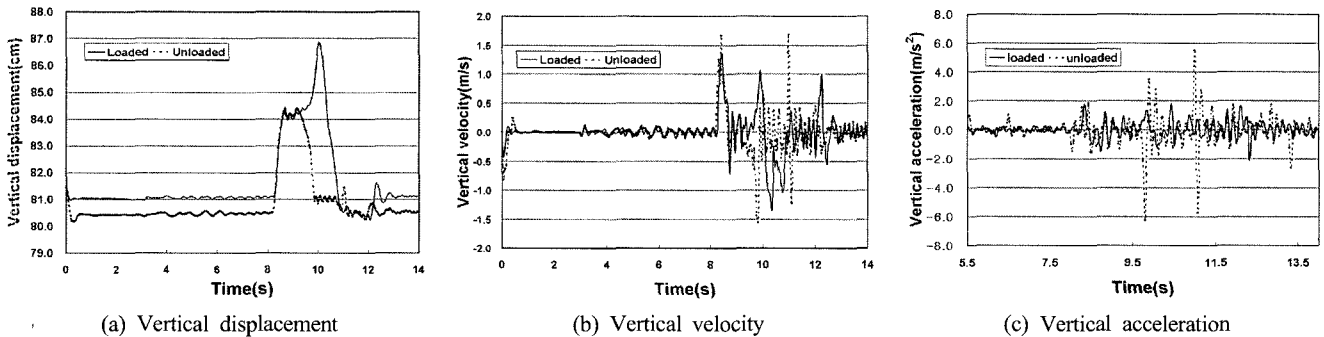


Fig. 12 Simulated motions of the proto-type loaded with 1.8 m long logs and unloaded when traversing over a 44×195 mm rectangular bump with a forward velocity of 1 m/s.

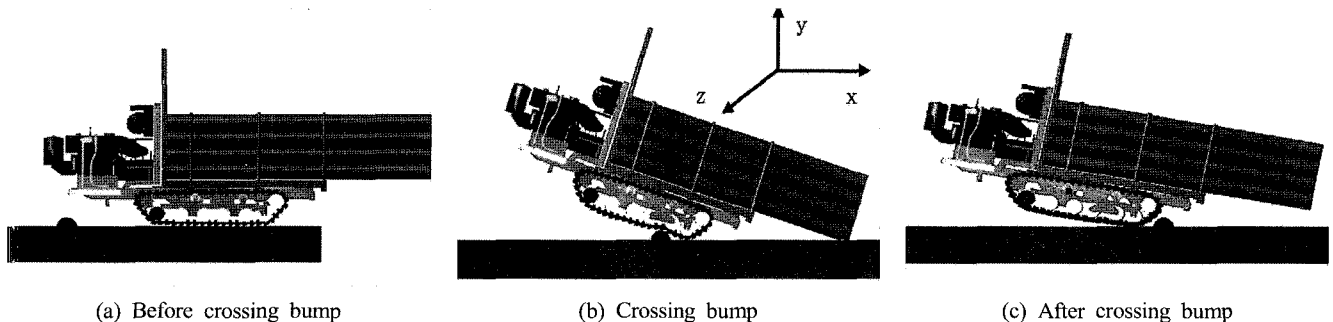


Fig. 13 Simulation of the proto-type load-ed with 11.7 kN of logs when traversing over a 150 mm height semi-circular bump with a forward velocity of 1 m/s.

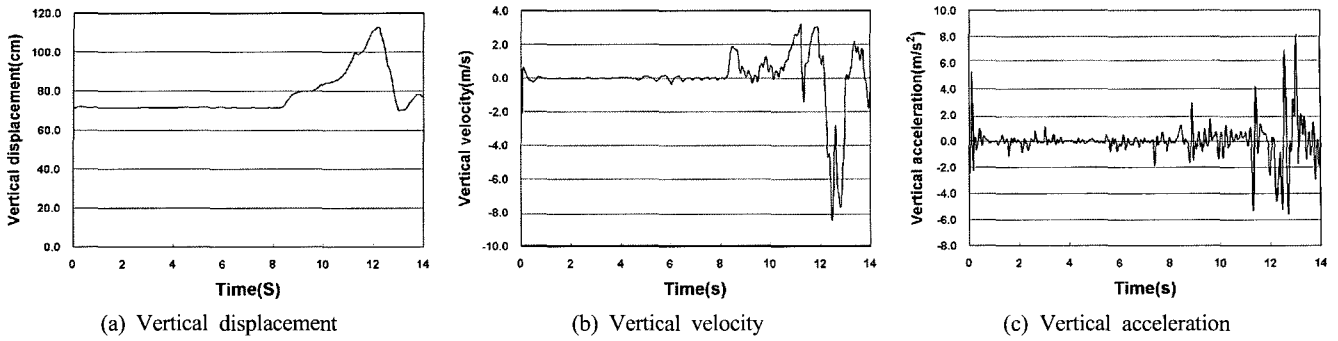


Fig. 14 Simulated motions of the proto-type loaded with 2.7 m long logs when traversing over a 150 mm height semi-circular bump with a forward velocity of 1 m/s.

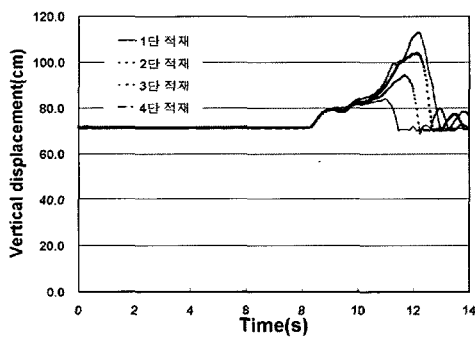


Fig. 15 Comparison of vertical displacement of the proto-type with different loadings when traversing over a 150 mm height semi-circular bump with a forward velocity of 1 m/s.

이가 나타나지 않았다. 따라서 장애물의 영향은 형상보다는 그 높이에 따라 결정되는 것으로 판단되었다. 실제 임지에서 장애물의 높이는 일반적으로 150 mm 이하이므로 케도 차량의 경우 이러한 높이 내에서는 장애물의 형상에 의한 영향은 크지 않는 것으로 판단된다.

적재량에 따라 시작기의 주행 안정성을 평가하기 위하여 길이가 2.7 m인 목재를 1단, 2단, 3단, 4단으로 적재한 상태에서 높이가 150 mm인 반원형 범퍼를 통과할 때 무게 중심의 수직 변위를 시뮬레이션하였다. 그림 15는 각각의 적재 상태에서 시뮬레이션한 무게 중심의 수직 변위를 나타낸 것이다. 적재 중량이 증가할수록 최대 수직 변위는 증가되었다. 3단과 4단 적재의 경우에는 목재의 후면이 지면에 닿아 범퍼를 통과할 수 없었다. 그러나 1단과 2단 적재에서는 모두 안정적으로 범퍼를 통과하였다. 따라서 목재의 길이가 2.7 m일 때 적재량은 2단까지만 가능한 것으로 판단된다.

4. 요약 및 결론

본 연구는 다물체 동역학 해석 프로그램인 RecurDyn을 이

용하여 현재 개발 중인 임내 작업 차량의 적재량에 따른 주행 안정성을 평가하기 위하여 수행되었다. 임내 작업 차량의 시작기를 모형화하고, 모형의 유효성을 검증하였으며, 검증된 시작기의 모형을 이용하여 단면의 크기가 44×195 mm인 사각 범퍼와 높이가 150 mm인 반원형 범퍼를 통과할 때 적재함 중심의 수직 변위, 속도, 가속도를 시뮬레이션하여 주행 안정성을 평가하였다. 또한 적재 목재를 모형화하여 적재량에 따라 시작기의 장애물 통과 여부를 평가하였다.

본 연구의 주요 결론은 다음과 같다.

1. 다물체 동역학 프로그램인 RecurDyn을 이용하여 개발 중인 임내차 시작기에 대한 주행 안정성과 장애물 통과 여부를 판단할 수 있었다.
2. 개발 중인 임내차 시작기는 적재 목재량이 많을수록 주행 안정성이 증가되었으나 길이가 2.7 m인 목재를 2단 이상으로 적재할 때는 목재의 끝이 지면에 닿아 주행이 불가능하였다.

참고 문헌

1. 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.
2. UGS, 2000, Solid Edge V8.0, Missouri.
3. Functionbay, 2003, RecurDyn V5.25, Seoul.
4. 정창주, 류관희, 김경옥. 1992. 농업동역학. 문운당.
5. 한국표준협회. 2001. KS B ISO 789-6 농업용 트랙터-무게 중심 시험 방법.Simulation of the proto-type load-ed with 11.7 kN of logs when traversing over a 150 mm height semi-circular bump with a forward velocity of 1 m/s.