

측면 적재형 소형 임내 작업 차량의 횡전도 시뮬레이션

심성보 박영준 김경욱 김재원 박문섭 송태영

Computer Simulation of Sideways Overturning of Side-Loaded Mini-Forwarder

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

Abstract

This study was conducted to evaluate the sideways overturning stability of side loaded mini-forwarder. The model of a prototype was developed using a 3D CAD modeler and the performance was experimentally validated. The prototype model was run on the multibody dynamic analysis program, RecurDyn 6.0, to simulate motions when the model traversed over a circular bump on a inclined ground surface. The simulation was performed at a constant forward speed of 1.85 km/h under the loaded and unloaded conditions. The forward direction was also controlled to vary from 0 to 360 degrees with an increment of 10 degrees. Results of the simulation showed safe regions in which the mini forwarder could travel safely in terms of direction and slope of the ground. Even when the mini-forwarder was loaded by 20 logs of 3.6 m long and 12 cm diameter, it traveled safely within the ground slopes of 1 to 45 degrees by directions.

Keywords : Mini-forwarder, Computer simulation, Stability evaluation, Stability area

1. 서론

소형 임내 작업 차량은 인력 위주의 간벌 작업을 기계화하기 위한 것으로서, 별도한 원목을 별도 장소에서 임도까지 운반, 집재하는 기능을 한다. 작업은 주로 1인이 할 수 있으며 2 m 이하의 좁은 노면을 주행할 수 있는 궤도형 차량이다.

임내 작업 차량은 주로 험준한 산악 지형에서 사용되기 때문에 일반 차량에서보다 높은 안정성이 요구된다. 목재를 적재한 상태에서뿐만 아니라 목재를 적재하지 않은 공차 상태에서도 높은 안정성이 요구된다.

이미 개발된 후면 적재형 임내 작업 차량은 안정성 평가에서 공차 주행시 무게 중심이 전방으로 이동하는 문제 즉, 무게 중심의 전이가 문제점으로 지적되었을 뿐만 아니라 길이 2.7 m, 3.6 m인 장재를 적재한 후에는 평지 주행에도 어려움이 있

었다(박 등, 2005). 이 문제를 해결하기 위하여 궤도의 길이를 증가시켜 무게 중심을 후방으로 이동하는 방법이 검토되었다. 그러나 이 방법은 차체의 길이가 길어져 산악 지형에서 차량의 기동성이 떨어질 뿐만 아니라 많은 비용이 소요되어 현실적으로 채택하기가 어려웠다. 따라서 적재 방식을 후면 적재에서 측면 적재로 변경하는 방안이 대안으로 제시되었다.

목재를 적재하였을 때와 적재하지 않았을 때의 안정성을 모두 확보하기 위해서는 차량의 무게 중심이 항상 차체의 중앙에 위치하여야 한다. 측면 적재형은 적재함의 크기를 크게 줄이지 않고 엔진과 원치의 무게 중심을 차체의 종방향 중심선 쪽으로 보다 가깝게 배치할 수 있기 때문에 후면 적재형보다 안정성을 높이는 데 효과적인 것으로 판단되었다.

본 연구는 국립산림과학원 산림생산기술연구소에서 개발한 소형 임내 작업 차량의 1차 시작기(박 등, 2005)에 대한 안정성

The article was submitted for publication in December 2006, reviewed and approved for publication by the editorial board of KSAM in April 2007. The authors are Sung Bo Shim, Graduate Student, Dept. of Biosystems Engineering, Seoul National University, Young Jun Park, Senior Researcher, KSAM member, Korea Institute of Machinery & Materials, Kyeong Uk Kim, Professor, KSAM member, Dept. of Biosystems Engineering, Seoul National University, Jae Won Kim, Assistant General Director, Moon Sub Park, and Tae Young Song, Researcher, Forest Practice Research Center. Corresponding author: K. U. Kim, Professor, Dept. of Biosystems Engineering, Seoul National University, 151-921, Seoul, Korea; Phone: 82-2-880-4602; Fax: 82-2-873-2049; E-mail: <kukim@snu.ac.kr>.

평가의 후속 연구로서, 측면 적재형으로 개발된 2차 시작기에 대한 안정성을 평가하기 위한 것이다. 즉, 측면 적재형 임내 작업 차량의 컴퓨터 시뮬레이션 모형을 개발하고, 이를 이용하여 임내 작업 차량의 안전 작업 영역을 구명하고자 하였다.

2. 측면 적재 소형 임내차 시작기

국립산림과학원 산림생산기술연구소에서 소형 임내 작업 차량의 2차 시작기로 개발한 측면 적재형 소형 임내 작업 차량은 1차 시작기로 개발된 후면 적재형 차량보다 무게 중심이 차량의 중앙에 위치하기 때문에 안정성 향상을 기대할 수 있다. 시작기의 모습은 그림 1에서와 같다. 차량의 크기는 길이가 2,210 mm, 폭이 1,453 mm, 높이가 2,265 mm이고, 총 중량은 8 kN이었다. 기관은 공랭 가솔린 2기통 기관으로서 최대 출력은 19 PS이었다. 차량은 궤도형 주행 장치와 차체부로 구성되어 있으며, 차체부에는 기관, 윈치, 변속 장치, 적재함 등이 설치되어 있다. 궤도형 주행 장치는 농업용 콤바인의 궤도 장치를 이용한 것으로서 6개의 전륜으로 구성되어 있다. 임내차는 1인이 목재를 적재하여 운반할 수 있는 1인 작업 시스템 차량으로 설계하였다. 표 1은 측면 적재형 시작

Table 1 Specifications of prototype side loaded mini-forwarder

Items		Specifications
Overall size		2.21 (L)×1.45 (W)×2.27 (H) m
Engine	Type	Air-cooled, gasoline engine
	Power	ps/rpm: 19/3,600
Weight		8 kN
Running gear		Rubber tracked drive Min. turning radius: 1.4 m
Winch		Max. pull speed: 80 m/min

기의 주요 제원을 나타낸 것이다.

3. 모형화

가. 시작기 모형화

시작기의 동적 모형은 차체부, 궤도부, 엔진부, 윈치부, 변속부로 구분하고 각 부분을 모형화한 후 이를 결합하는 방법으로 개발하였다. 좌우 궤도부는 각각 46개의 궤도 링크, 6개의 전륜, 1개의 지지 롤러, 1개의 스프로킷으로 구성하였다. 각 모형은 설계 도면을 이용하여 실물의 형상대로 작성하였으며, 모형화를 위한 프로그램은 Solid Edge V8.0(UGS, Missouri, USA)을 이용하였다. 모형에 사용된 강재의 밀도는 7,800 kg/m³으로 하였다. 그림 2와 3은 이와 같은 방법으로 개발한 차체부, 궤도부, 엔진부, 윈치부, 변속부의 모형과 이를 결합한 시작기의 모형을 나타낸 것이다.

그림 3에서 기준 좌표계의 원점은 궤도부의 오른쪽 스프로킷의 무게중심이고 -X 방향은 임내차의 전진 방향과 같다. 모형으로 구한 기준 좌표계에 대한 시작기의 무게, 무게 중심, 각 축에 대한 질량관성모멘트는 각각 표 2에서와 같다. 궤도 사이의 거리는 1,150 mm이었다.

나. 적재목의 모형

적재목의 수종은 잣나무로 하였으며, 모형에 필요한 치수는 조재목 17개를 직접 측정하여 구한 평균을 사용하였다.

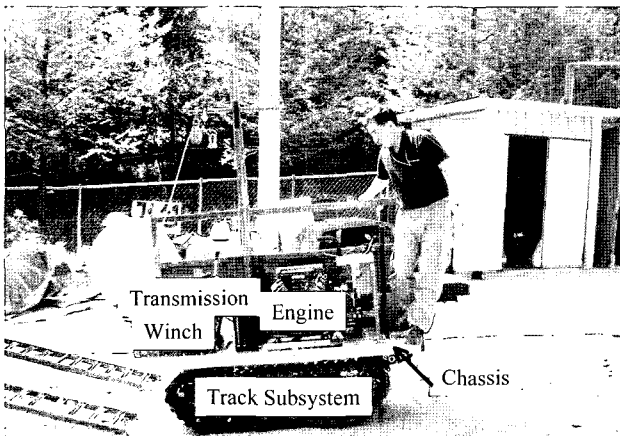


Fig. 1 A view of prototype side-loaded mini-forwarder.

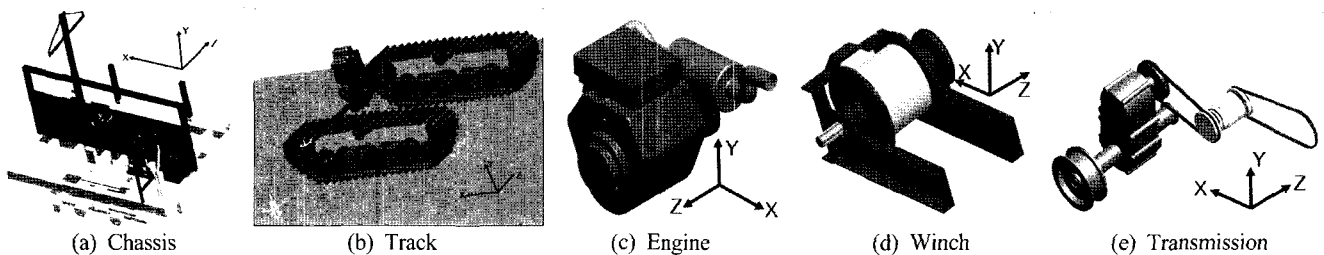


Fig. 2 Solid models of prototype components.

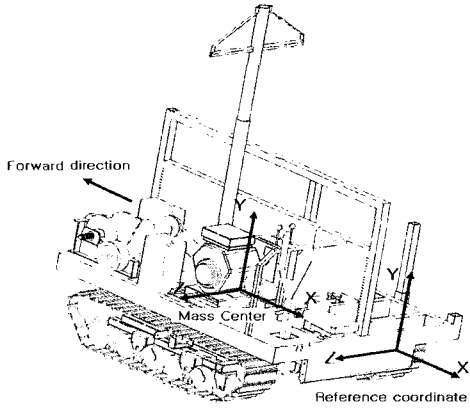


Fig. 3 Model of prototype assembly.

Table 2 Mass properties of prototype model

Total mass, kg		825.4
Mass center, mm		-636.5, 288.2, 670.0
Mass moment of Inertia, $kg \cdot m^2$	I_{xx}	265.4
	I_{yy}	369.1
	I_{zz}	334.3

표 3은 측정된 잣나무의 평균 지름, 길이, 체적, 질량을 나타낸 것이다. 표 3의 자료를 바탕으로 하여 직경이 120 mm, 길이가 3600 mm인 적재목을 모형화하였다.

적재함에는 그림 4에서와 같이 5개의 목재를 4단으로 쌓아 총 20개의 목재를 적재하는 것으로 하였다. 20개의 적재목은 3D 모델러에서 모형화한 후 물리적 속성과 함께 RecurDyn (Functionbay, Seoul, Korea)에 입력하였다. 20개의 적재목과 적재함은 임내차가 장애물을 통과할 때 발생하는 충격의 영향을 받지 않도록 일체로 고정하였다. 표 4는 RecurDyn에서 모형화한 적재목 20개의 총질량, 무게 중심, 질량관성모멘트를 나타낸 것이다. 모형으로 구한 적재목의 총질량은 878 kg이었으며, 실제 질량에 대한 %오차는 0.002%이었다.

Table 3 Average size of cut-to-length log model

	Diameter (mm)	Length (mm)	Volume (m^3)	Mass (kg)
Mean	120	3,760	0.0541	52

다. 지면 모형

지면은 산림 지대의 토양을 사양토로 가정하고 모형화하였으며, 토양의 전단 응력과 전단 변위의 관계는 Janosi-Hanamoto (1961)가 제시한 식 (1)과 Bekker(1969)가 제시한 압력-침하 관계식 (2)를 사용하였다. RecurDyn에서 사용한 토양 변수의

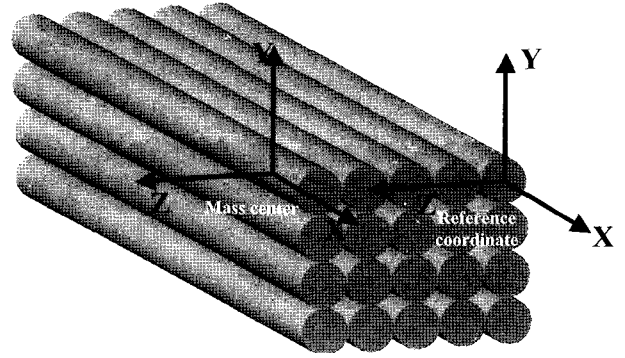


Fig. 4 Modeling for cut-to-length log.

Table 4 Mass properties of cut-to-length log

Total mass, kg		878
Mass center, mm		-1800, -180, 240
Mass moment of Inertia, $kg \cdot m^2$	I_{xx}	42.70
	I_{yy}	974.3
	I_{zz}	964.8

값은 프로그램에서 제공한 사양토에 대한 값으로 하였으며, 각 토양 변수의 값은 표 5에서와 같다.

$$\tau = (c + p \tan \phi)(1 - e^{-j/K}) \quad (1)$$

$$p = (k_c + \frac{k_\phi}{b})z^n \quad (2)$$

- 여기서, c = 토양의 점착력
- ϕ = 토양의 내부 마찰각
- j = 토양의 전단 변위
- K = 토양의 전단 변형 계수
- k_c = 점성에 의한 토양 변형 상수
- k_ϕ = 마찰에 의한 토양 변형 상수
- n = 토양 변형 지수

Table 5 Soil parameters used for the ground model

Soil parameters	Specifications
Terrain stiffness, k_c	0.351
Terrain stiffness, k_ϕ	0.018
Exponential number, n	0.3
Cohesion, c	0.014
Shearing Resistance Angle, $^\circ$	22
Shearing deformation modulus, k	25
Sinkage ratio	0.05

라. 장애물 모형

장애물 모형은 그림 5에서와 같은 두 가지 형태를 선택하였다. 이는 국방과학연구소의 군용 궤도 차량 기동 시험장에 설치되어 있는 내구 노면을 기본으로 한 것이다. 그 중에서도 그림 5(a)와 같은 Single-symmetric bump를 선택하였다. 그러나 해석프로그램 상에서 그라운드와 특성이 다른 강체 범프는 그림 5(a)에서와 같은 모양으로 모형화 할 수 없기 때문에 모형화가 가능하면서 그림 5(a)의 범프와 형상이 가장 비슷하고 높이와 접근각이 같은 그림 5(b)와 같은 반구형 범프로 모형화하였다. 장애물의 영향은 형상보다는 그 높이와 접근각에 따라 결정되므로(박 등, 2005) 형상의 차이에 따른 두 범프 사이의 영향은 없는 것으로 가정하였다. 그림 5(a)는 단면의 밑변이 500 mm이고 높이가 80 mm인 반원기둥형 범프이며 재질은 지면과 같은 사양토이다. 범프는 임내차의 주행 방향과 직각이 되도록 설치하였다. 그림 5(b)는 직경이 430 mm, 높이 80 mm인 반구형 강체 범프이며, 그림에서와 같이 주행 노면 상에 설치하였다. 장애물로서 이러한 토양 범프와 강체 범프를 사용하였을 때 각 범프에서의 한계 경사각을 시뮬레이션하였고, 임내차가 통과할 수 있는 안전 영역을 구하였다.

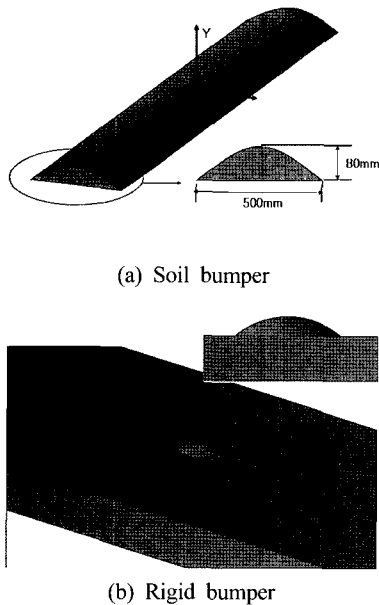


Fig. 5 Types of obstacle model used for bump simulation.

4. 시작기의 모형 검증

모형의 검증은 시작기를 구성하는 기관, 윈치, 궤도, 변속기 및 시작기 조합의 실제 중량과 각각의 모형으로 예측한 중량을 비교하는 방법으로 실시하였다. 표 6은 임내차를 구성하는

Table 6 Errors in weights of components and assembly predicted by models

Components	Prototype	Model	% Error
Winch, N	363.95	363.97	0.005%
Track, N	1638.3	1616.1	1.36%
Engine, N	388.5	386.3	0.57%
T/M, N	384.6	405.5	5.43%
Assembly, N	8093.3	8096.8	0.04%

각 부분의 실제 중량과 각 모형으로 예측한 중량을 비교하여 나타낸 것이다. 모형의 % 오차는 0.005-5.43% 이었으며, 최대 오차는 변속기로서 5.43%이었고 시작기 조합 전체에 대한 % 오차는 0.04%이었다.

중량의 비교검증 뿐만 아니라 차체에 대한 관성 모멘트와 전도 현상에 대한 비교검증도 수행한다면 모형의 신뢰성을 더욱 높일 수가 있다. 하지만 본 연구에서는 박 등(2005)의 연구에서와 같은 방법으로 모형화하였기 때문에 무게 중심 및 질량 관성 모멘트는 실제 모델과 큰 차이를 보이지 않을 것이라 판단하여 수행하지 않았다. 또한, 전도 현상에 대한 실차 실험은 위험 요소가 많기 때문에 현실적으로 수행하기가 어려웠다.

5. 횡전도 시뮬레이션

시작기의 모형을 이용하여 시작기가 경사 위쪽의 장애물을 통과할 때 전도에 대한 안정성을 시뮬레이션하였다. 시뮬레이션은 동역학 해석 프로그램인 RecurDyn 6.0을 이용하여 수행하였다.

시뮬레이션은 목재를 적재하였을 때와 적재하지 않았을 때를 구분하여 실시하였으며, 임내차가 일정한 속도로 주행할 때 주행 방향과 지면의 경사도에 따라 전도가 일어나지 않는 안전 영역을 예측하였다.

주행 속도는 시작기의 실제 주행 속도를 고려하여 결정하였다. 목재를 적재하지 않았을 때 임도에서 시작기의 주행 속도는 경사지를 오를 때 1.6~5.4 km/h 이었으며, 경사지를 내려갈 때는 1.7~5.8 km/h이었다. 목재를 적재하였을 때에도 주행 속도에는 큰 차이가 없었다. 시뮬레이션에서는 안전을 고려하여 주행 속도를 1.85 km/h로 가정하였다.

지면 경사도는 평지에서 1° 간격으로 50°까지 증가시켰으며, 주행 방향은 경사 위쪽 방향을 기준으로 하여 시계 방향으로 10°씩 360°까지 변화시켰다.

각 주행 방향에 대한 장애물 위치는 임내차의 진행 방향과 90°가 되도록 고정하여 동일한 조건을 유지하였으며, 장애물

은 경사 위쪽의 궤도만이 통과하도록 하였다. 즉, 주행 방향이 $0^\circ < \theta < 180^\circ$ 일 때는 차량의 후면에서 보았을 때 왼쪽 궤도가 장애물을 통과하며, $180^\circ < \theta < 360^\circ$ 일 때는 오른쪽 궤도가 장애물을 통과하게 된다. 단, 0° 와 180° 일 때는 양쪽 궤도가 모두 범프를 통과한다. 즉, 주행 방향이 0° 와 180° 일 때에는 양쪽의 궤도가 모두 범프를 통과하기 때문에 전·후방 전도가 일어나게 되며, 그 외의 주행 방향에서는 경사 방향의 궤도만 범프를 통과하기 때문에 횡전도가 일어나게 된다.

그림 6에서 방사 방향은 임내 작업 차량의 주행 방향을 나타내며, 동심원의 크기는 지면의 경사도를 나타낸다. 각 주행 방향에서 시작기의 전도가 시작되는 지면의 기울기를 구하였다. 이 전도 한계 경사각을 연결한 내부 영역은 전도가 일어나지 않는 안전 영역이 되며, 외부 영역은 전도가 일어날 가능성이 있는 불안정한 영역이 된다.

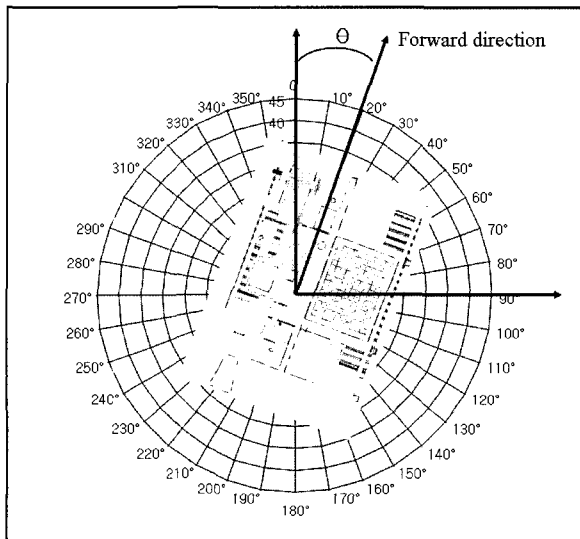


Fig. 6 Traveling directions and gradients for simulating sideways overturning of the mini-forwarder.

6. 결과 및 고찰

안전 영역은 변속 단수, 적재 상태, 토양 및 범프의 조건, 등 모든 조건을 고려하여 각각의 경우에 대하여 구해야 한다. 하지만 임도가 아닌 임내의 경사지에서는 거의 저속 1단(약 1.85 km/h)인 상태에서만 주행하므로 변속 단수에 따른 안전 영역은 생략하였다. 또한 적재 상태도 공차일 경우와 가장 열악한 상태인 길이가 3.6 m인 목재를 4단 적재 하였을 경우에 대해서만 안전 영역을 구하였다. 따라서 본 연구에서는 측면 적재 방식인 임내차 시작기의 안전 영역을 다음과 같은 4조건에서 구하였다.

가. 무적재로 강제 범프를 통과할 때

그림 7은 목재를 적재하지 않고 강제 범프를 통과할 때의 안전 영역을 시뮬레이션한 결과이다. 주행 방향이 0° 일 때, 한계경사각은 10° 이고 90° 일 때는 44° 로 나타났다. 그림 8은 주행 방향이 290° 일 때 횡전도 한계각에서 횡전도가 일어나는 임내차의 모습을 시뮬레이션한 것이다.

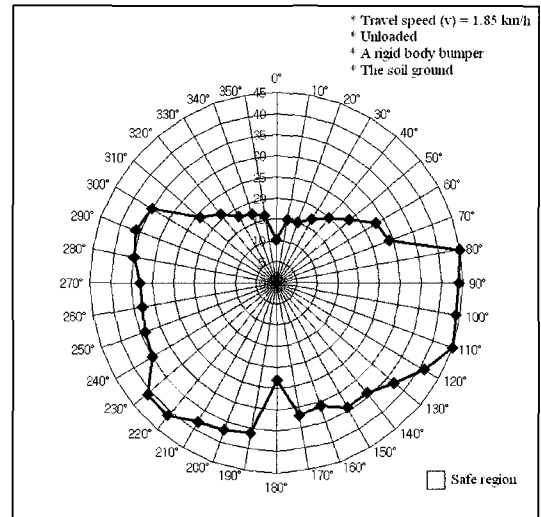
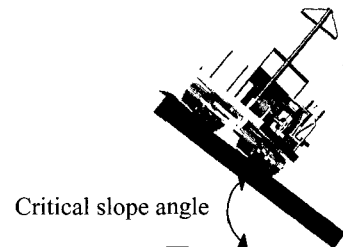
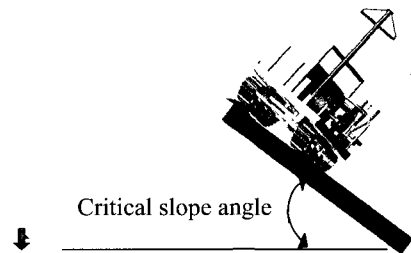


Fig. 7 Safe region when tracked mini-forwarder override a rigid bump with unloaded condition against sideways overturning.



(a) Before crossing bump



(b) Crossing bump

Fig. 8 Critical slope angle of side loaded mini-forwarder when $\theta=290^\circ$.

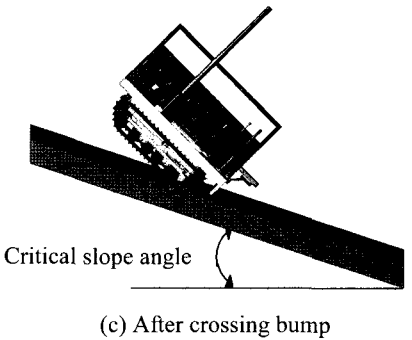
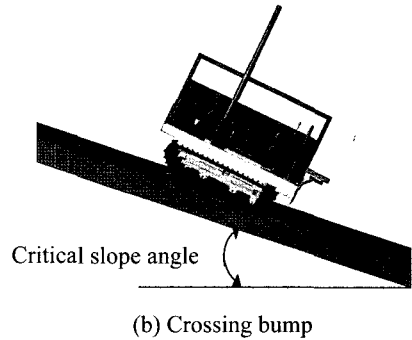
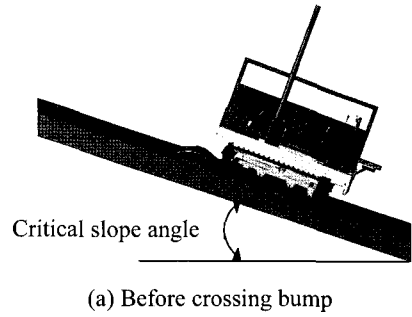
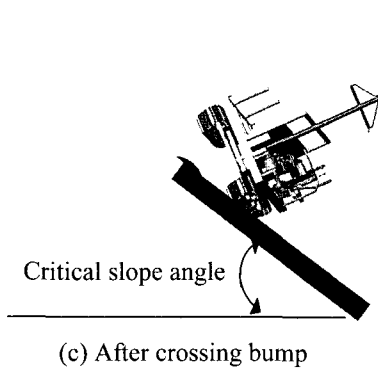


Fig. 8 Critical slope angle of side loaded mini-forwarder when $\theta=290^\circ$. (Continued)

Fig. 10 Critical slope angle of side loaded mini-forwarder when $\theta=0^\circ$.

나. 무적재로 토양 범프를 통과할 때

그림 9는 목재를 적재하지 않은 상태에서 토양 범프를 통과할 때의 안전 영역을 시뮬레이션한 결과이다. 주행 방향이 0° 일 때, 한계 경사각은 17° 이고 90° 일 때는 44° 로 나타났다. 그림 10은 주행 방향이 0° 일 때 횡전도 한계각에서 후방 전도가 일어나는 임내차의 모습을 시뮬레이션한 것이다.

목재를 적재하지 않은 상태에서 토양 범프와 강제 범프에 의한 한계 경사각의 차이는 주행 방향이 180° 일 때 가장 크게 나타났다. 이는 주행 방향이 180° 일 때 범프가 가장 크게 파괴되기 때문인 것으로 판단된다. 즉, 범프가 파괴됨으로써 장애물의 영향이 그만큼 감소하기 때문에 전도 한계각이 증가하는 것으로 판단된다.

주행 방향이 등고선 방향일 때는 주행 방향이 90° 일 때가 270° 일 때보다 한계 경사각이 큰 것으로 나타났다. 이는 주행

방향이 90° 일 때 임내차의 무게 중심이 270° 일 때보다 경사 위쪽에 위치하여 그만큼 횡전도 모멘트를 감소시키기 때문인 것으로 판단된다.

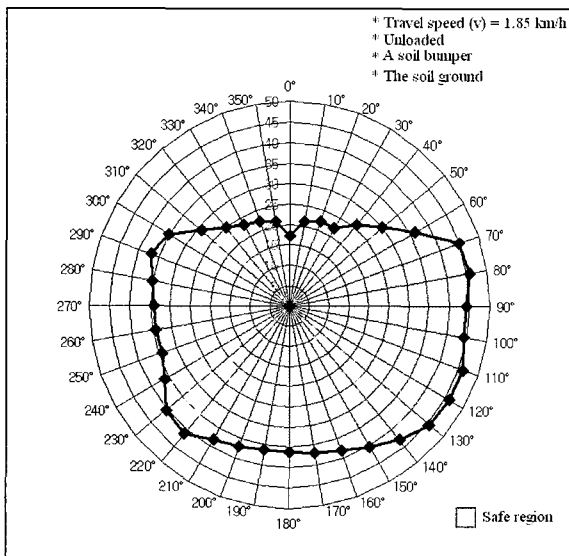


Fig. 9 Safe region when tracked mini-forwarder override a soil bump with unloaded condition against sideways overturning.

다. 적재 상태로 토양 범프를 통과할 때

그림 11은 목재를 적제한 상태에서 토양 범프를 통과할 때의 안전 영역을 시뮬레이션한 결과이다. 주행 방향이 0° 일 때, 한계경사각은 8° 이고 90° 일 때는 25° 로 나타났다. 그림 12는 주행 방향이 260° 일 때 횡전도 한계각에서 전도가 일어나는 임내차의 모습을 시뮬레이션한 것이다.

라. 적재 상태로 강제 범프를 통과할 때

그림 13은 목재를 적제한 상태에서 강제 범프를 통과할 때

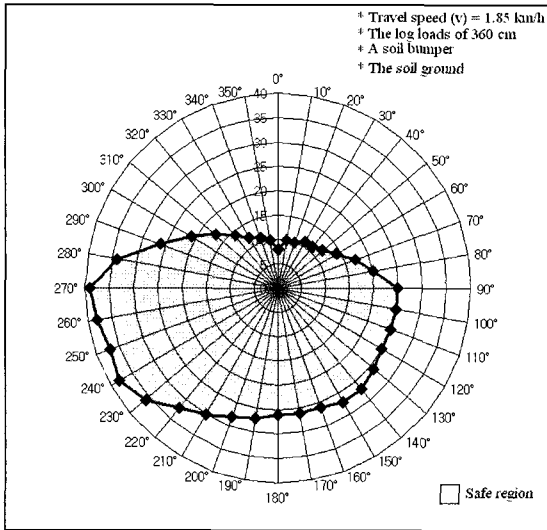


Fig. 11 Safe region when tracked mini-forwarder override a soil bump with loaded condition against sideways overturning.

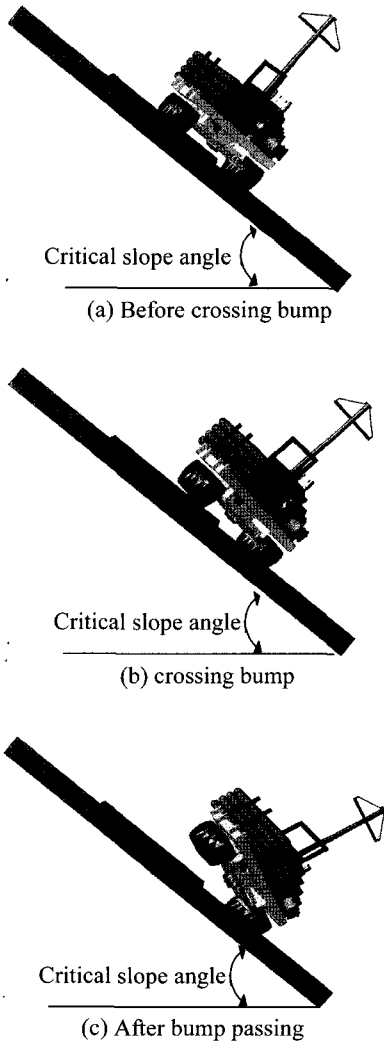


Fig. 12 Critical slope angle of side loaded mini-forwarder when $\theta=260^\circ$.

의 안전 영역을 시뮬레이션한 결과이다. 주행 방향이 0° 일 때, 한계 경사각은 1° 이고 90° 일 때는 25° 로 나타났다. 그림 14는 주행 방향이 80° 일 때 횡전도 한계각에서 횡전도가 일어나는 임내차의 모습을 시뮬레이션한 것이다.

물체를 적재한 상태에서도 토양 범프와 강체 범프에 의한 한계 경사각의 차이는 주행 방향이 180° 일 때 가장 크게 나타났다. 이는 물체를 적재하지 않았을 때와 같은 이유인 것으로 판단된다.

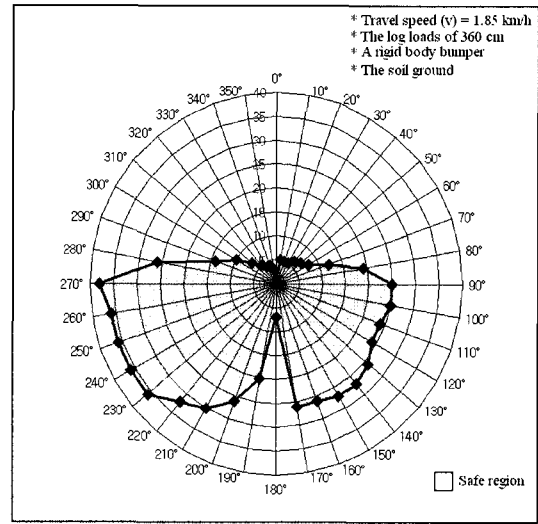


Fig. 13 Safe region when tracked mini-forwarder override a rigid body bump with loaded condition against sideways overturning.

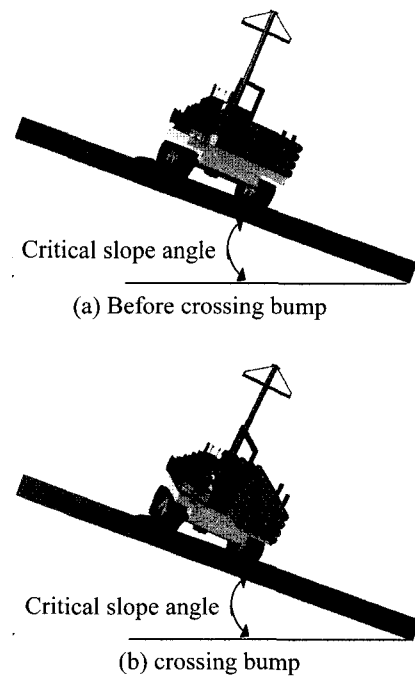


Fig. 14 Critical slope angle of side loaded mini-forwarder when $\theta=80^\circ$.

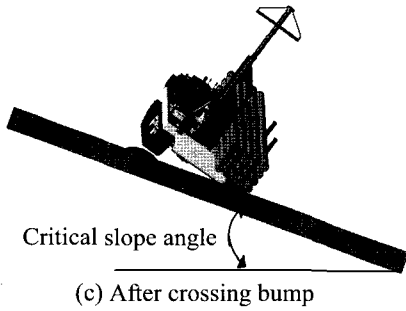


Fig. 14 Critical slope angle of side loaded mini-forwarder when $\theta=80^\circ$. (Continued)

토양 범프를 통과할 때 토양 범프의 파괴로 인한 안전성 향상은 목재를 적재하지 않았을 때의 경우와 같았다. 그러나 주행 방향이 등고선 방향일 경우에는 목재를 적재하였기 때문에 목재를 적재하지 않았을 때와는 반대로 주행 방향이 270° 일 때 무게 중심이 경사 위쪽으로 이동하여 횡전도에 대한 안정성이 증가되었다.

위의 네 가지 조건에서 측면 적재 방식 임내차 시작기의 안전 영역을 구한 결과 일반적으로 경사 방향으로 차량이 진행할 때 보다 등고선 방향으로 진행할 때의 안전성이 높았다. 특히 범프가 양쪽 궤도를 모두 통과하여 전·후방 전도가 일어나는 주행방향인 0° 와 180° 에서는 안전성이 낮은 것으로 나타났다. 따라서 임내차가 경사 방향으로 주행할 때 안전성을 향상시키기 위한 방안이 마련되어야 할 것으로 판단된다.

7. 요약 및 결론

본 연구에서는 측면 적재 방식의 임내차 시작기를 대상으

로 동적 모형을 개발하고, 적재목의 유무, 지면 경사도, 장애물의 강도, 주행 방향에 따라 한계 전도각을 시뮬레이션하여 안전 주행 영역을 제시하였다. 주요 연구 결과는 다음과 같다.

1. 국립산림과학원 산림생산기술연구소에서 개발한 측면 적재 방식의 임내차 시작기는 일반적으로 경사 방향으로 주행할 때보다 등고선 방향으로 주행할 때의 안전성이 높았으며, 횡전도 보다 전·후방 전도의 안전성이 낮았다.
2. 안전 주행 영역을 구한 결과 적재 상태, 범프의 종류, 주행방향각(θ)에 따라 지면 경사가 1° 에서 45° 이내에서는 안전하게 주행할 수 있는 것으로 나타났다.

참고 문헌

1. Bekker, M. G. 1969. Introduction to Terrain-Vehicle Systems. University of Michigan Press, Ann Arbor.
2. Functionbay, 2005. RecurDynV6.0, Seoul.
3. Janosi, Z. and B. Hanamoto. 1961. The analytical determination of drawbar pull as a function of slip for tracked vehicle in deformable soils. Proceedings of 1st International Conference on the Mechanics of Soil Vehicle Systems. Edizioni Minerva, Tecnica, Torino.
4. UGS. 2000. Solid Edge V8.0. Missouri.
5. 박해권. 2005. 소형 임내 작업 차량의 안정성 분석. 서울대학교 대학원 농업기계전공 석사학위논문.
6. 박해권, 김경욱, 심성보, 김재원, 박문섭, 송태영. 2005. 컴퓨터 시뮬레이션을 이용한 소형 임내차 시작기의 장애물 통과 및 적재 안정성 평가. 한국농업기계학회지 30(6):366-372.