

다물체 동역학 해석 프로그램을 이용한 포워더의 횡전도 분석

Sideways Overturning Analysis of Forwarder Using a Multibody Dynamics Analysis Program

박현기 김경욱 김재원 송태영 박문섭 조구현
정희원 정희원
H. K. Park K. U. Kim J. W. Kim T. Y. Song M. S. Park K. H. Cho

ABSTRACT

The objective of this study was to analyze a stability of sideways overturning of a forwarder developed by the Forestry Research Institute. The stability analysis was conducted using a multibody dynamic analysis program, VisualNastran Desktop. A solid model of the forwarder was constructed and its physical properties such as mass, mass center and mass moment of inertia were determined on 3D CAD modeler of the Solid Edge 8.0. 3D simulations of sideways overturning of the forwarder were also performed on the Visual Nastran using the solid model when it traveled across the slope and traversed over an up-hill side obstacle. Stability comparison between a bogie-wheeled and a 6-wheeled forwarders was also made and found that the bogie-wheeled forwarder was more stable than the 6-wheeled one on slopes. The safety speeds of the forwarder predicted by the simulation under various conditions can be used as a guideline for safe operations of forwarders in mountainous area. The technique of using a solid model for the stability analysis can also be applied successfully to other vehicles like agricultural tractors, loaders and construction equipments.

Keywords : Forwarder, Sideway overturning, Stability analysis, Computer simulation

1. 서 론

포워더(forwarder)는 차체에 크레인(crane)과 그레플(grapple)을 탑재한 적재집재 차량으로서, 벌도된 원목을 상차하여 임도변의 토장까지 운반하는 기계이다. 임업기계의 국산화를 위하여 임업연구원 중부임업시험장에서 개발한 포워더(김, 2001)는 그룹 1에서와 같이 운전부와 적재부로 구분되어 있으며, 적재부는 2톤의 원목을 적재할 적재함과 집

재 작업에 사용될 크레인과 로그 그레플로 구성되어 있다. 주행 장치는 6륜 구동이고, 운전자를 포함하여 1~2인이 운용할 수 있도록 개발되었다.

포워더에는 험한 지형에서 작업하거나 주행하기 때문에 많은 위험이 따른다. 위험은 주로 주행 조건과 차량 자체의 원인에 의하여 야기된다. 주행 조건에서는 임로의 노면 상태, 경사도, 장애물 등이 원인이 되며, 차량 자체에서는 크레인, 적재함에 실린 원목, 차량의 최저 지상고 등이 원인이

This study was conducted by the research fund supported Technology Development Program for Agriculture and Forestry, Ministry of Agriculture and Forestry. The paper was submitted for publication in March 2002, reviewed and approved for publication by the editorial board of KSAM in May 2002. The corresponding author is K. U. Kim, Professor, School of Bioresources and Material Engineering, Seoul National University, Suwon, Korea. e-mail: kukim@plaza.snu.ac.kr

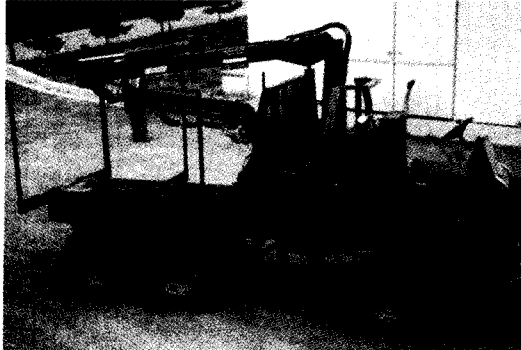


Fig. 1 A view of developed forwarder.

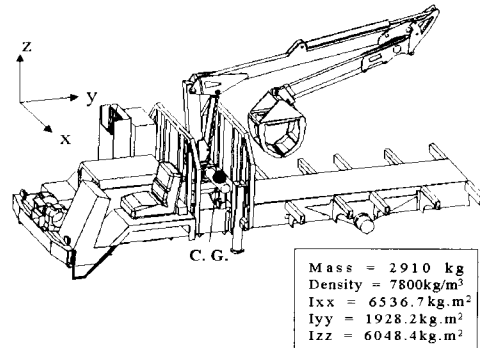


Fig. 2 Model of main structure of forwarder.

된다. 탑재된 크레인과 적재된 원목은 포워더 무게 중심의 지상고를 높이기 때문에 안정성을 감소시킨다 (Nabo, 1992).

포워더의 횡전도는 경사가 심한 지형에서 장애물을 통과할 때 발생하는 경우가 많다. 특히, 횡전도는 등고선 방향으로 주행하면서 경사 위쪽의 후륜이 장애물과 충돌할 때 가장 일어나기 쉽다(현, 1989). 이때 장애물과 충돌한 후륜이 지면과 분리되면 1차 횡전도 축에 대하여 1차 횡전도가 일어나고, 1차 횡전도 각이 앞차축의 최대 회전각을 초과하면 2차 횡전도가 일어난다(Kim and Reugler, 1987). 그러나 이러한 횡전도는 4륜 포워더에 적용되며, 탠덤 보기(tandem bogie) 차륜을 장착한 6륜 포워더에는 적용되지 않는다. 보기 차륜은 차체에 피봇된 보기 프레임의 양쪽에 구동륜이 장착된 구조이다. 이러한 구조는 차륜이 장애물과 충돌할 때 피봇점을 중심으로 보기 프레임이 좌우로 요동할 수 있기 때문에 일정 속도 이내에서는 차륜이 장애물을 타고 넘어갈 수 있다. 즉, 지형에 순응하며 주행할 수 있기 때문에 차체의 진동을 감소시키고 안정성을 높일 수 있다.

본 연구는 임업연구원에서 개발한 포워더의 주행 안정성을 평가하기 위하여 수행되었으며, 구체적인 목적은 다음과 같다.

1) 3D CAD 모델러(엄 등, 2001)를 이용하여 포워더를 3차원으로 모형화하고, 무게, 무게 중심, 질량관성모멘트 등 모형의 물리적 속성을 결정한다.

2) 실제 포워더의 속성을 측정하여 모형의 타당성을 검증한다.

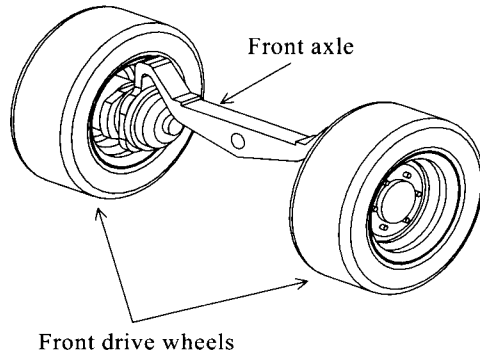


Fig. 3 Solid model of front axle assembly.

3) 검증된 모형과 3차원 다물체 동역학 해석 프로그램인 VisualNastran을 이용하여 경사지에서 등고선 방향으로 주행하는 포워더의 횡전도 현상을 시뮬레이션하고 횡전도에 대한 안정성을 평가한다.

2. 포워더의 3D 모델링과 물리적 속성 결정

포워더의 3D 모형은 제작 도면을 참고하여 그림 2~그림 4에서와 같이 차량 본체부, 앞차축부, 보기 차륜부로 구성하였으며, 3D CAD 모델러인 Solid Edge를 이용하여 개발하였다. 또한, 각 구성부의 무게, 무게 중심을 기준으로 질량 관성모멘트는 Solid Edge의 Physical Properties 기능을 이용하여 표 1에서와 같이 구하였다. 모형화의 과정은 박(2001)의 논문에 상세히 제시되어 있다. Solid

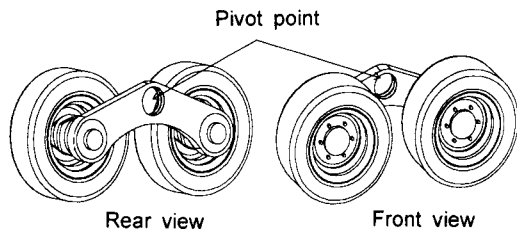


Fig. 4 Solid model of bogie wheel assembly.

Table 1 Predicted physical properties of forwarder components

Component	Predicted physical properties
Driving wheel	Mass(kg) : 122
	Density(kg/m ³) : -
	I _{xx} (kg · m ²) : 3.89
	I _{yy} (kg · m ²) : 4.18
	I _{zz} (kg · m ²) : 4.25
Front axle	Mass(kg) : 80.9
	Density(kg/m ³) : 7800
	I _{xx} (kg · m ²) : 0.74
	I _{yy} (kg · m ²) : 8.4
	I _{zz} (kg · m ²) : 8.2
Bogie frame	Mass(kg) : 34
	Density(kg/m ³) : 7800
	I _{xx} (kg · m ²) : 4.1
	I _{yy} (kg · m ²) : 0.74
	I _{zz} (kg · m ²) : 3.4
Main body assembly	Mass(kg) : 2910
	Density(kg/m ³) : 7800
	I _{xx} (kg · m ²) : 6536.7
	I _{yy} (kg · m ²) : 1928.2
	I _{zz} (kg · m ²) : 6048.4
Loaded lug	Mass(kg) : 2000
	Density(kg/m ³) : 850
	I _{xx} (kg · m ²) : 2203
	I _{yy} (kg · m ²) : 397
	I _{zz} (kg · m ²) : 2529

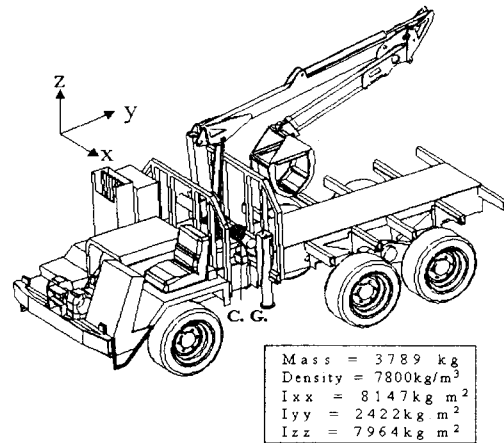


Fig. 5 Completed 3D solid model of forwarder.

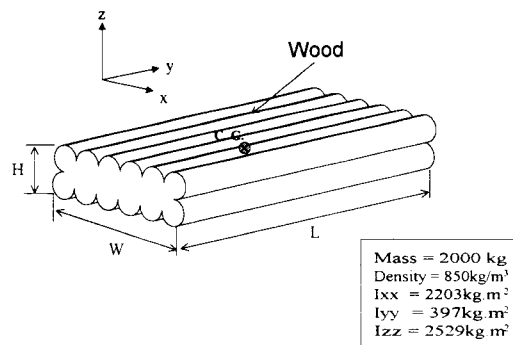


Fig. 6 Solid mode of loaded logs.

Edge를 이용하여 개발된 모형은 다물체 동력학 해석 프로그램인 VisualNastran에서 모형에 대한 각종 시뮬레이션을 용이하게 수행할 수 있는 장점이 있다. 각 구성 부분의 모델을 이용하여 그림 5에서와 같이 본체부의 프레임 앞쪽 힌지축에 앞차축부의 중앙을 피봇으로 결합하고 프레임의 후방 양측면에 보기 차륜부를 피봇으로 결합하여 전체 3D 포워더 모델을 완성하였다. 또한, 전체 모델의 밀도, 무게, 무게 중심, x, y, z축에 대한 질량관성 모멘트를 구하여 함께 나타내었다.

적재함의 원목은 실제 적재되는 원목의 체적, 모양, 길이 등을 고려하여 그림 6에서와 같이 모형화하였다. 보통 산지에서 벌목되는 원목의 지름은 20-25 cm 정도이고, 길이는 360 cm 정도이다.

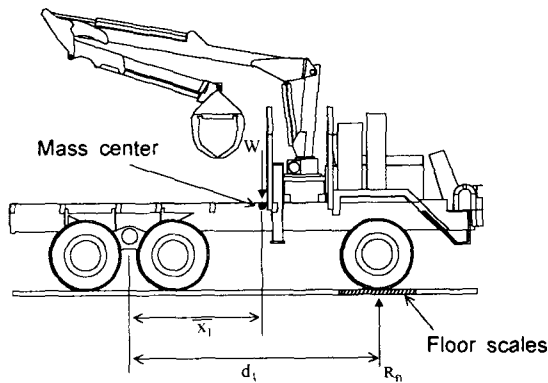


Fig. 7 Determination of mass center in x-axis direction.

또한, 적재량은 안전을 고려하여 2~3 m³을 초과하지 않는 것으로 알려져 있다. 따라서, 적재한 원목의 모형은 길이(L), 폭(W), 높이(H)를 각각 360×150×50 cm로 하였으며, 적재 형태는 지름이 25 cm인 원목을 2단으로 적재한 것으로 하였다

3. 모형의 물리적 속성 검증

3D CAD 모델러로써 결정한 포워더 모델의 물리적 특성을 검증하기 위하여, 실제 포워더의 무게, 무게 중심 등을 측정하여 모델의 예측값과 비교하였다.

개발된 실제 포워더의 무게와 무게 중심을 측정하기 위하여 연료와 작동유를 규정대로 채우고, 6개 타이어의 공기압을 일정하게 조정하였다. 그림 7과 그림 8에서와 같이 포워더를 수평 지면에 정차시킨 후 각각의 차륜에 작용하는 지면 반력을 측정하여 총 무게와 무게 중심을 산출하였다. 표 2는 실측한 각 구성 부분의 무게와 포워더의 무게 중심의 위치를 모델로써 예측한 값과 비교하여 나타낸 것이다. 포워더는 그 형상과 구조가 복잡하기 때문에 모델을 이용하여 정확한 물리적 속성치를 구하기는 어려웠다. 표 2에서와 같이 측정값과 예측값의 %오차는 0.8~9.0%의 범위로서, 포워더의 총무게에서 5.0%, 무게 중심의 위치에서 9.0%이었다. 무게중심의 지상고에 대한 예측치가 측정치보다 작은 것은 모델에서 크레인과 구동 장치에 부착된 유압 호스, 밸브 등을 포함하지 않았기 때

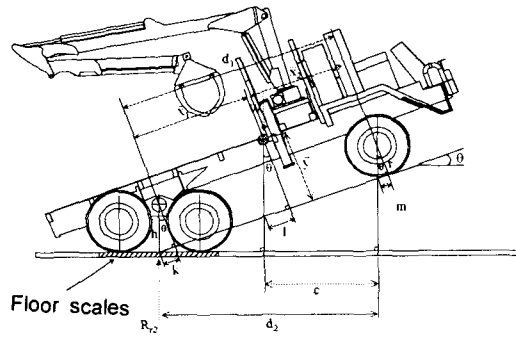


Fig. 8 Determination of mass center in y-axis direction.

Table 2 Comparison with measured and predicted physical properties

	Measured spec. of forwarder	Predicted value using 3D modeler	%Error
Weight of driving wheel	1206.6 N	1196.8 N	0.8%
Weight of crane	7543.9 N	7642 N	1.3%
Total weight of forwarder	39.1 kN	37.2 kN	5.0%
Location of mass center in x axis direction (\bar{x})	147 cm	149 cm	1.4%
Location of mass center in y-axis direction (\bar{y})	107 cm	96 cm	9.0%

문인 것으로 판단된다. 그러나, 본 연구에서는 안정성의 절대적인 평가보다는 운전조건 및 지형 조건이 안정성에 미치는 영향을 상대적으로 평가하기 위한 것이었기 때문에, 이 정도의 차이는 모형을 이용하여 포워더의 안정성을 예측하는 데 큰 문제가 없을 것으로 판단하였다.

4. 3D 횡전도 시뮬레이션

가. 시뮬레이션 모델링

3D 횡전도 시뮬레이션은 3D CAD 모델러에서 구현한 포워더와 적재 원목의 모형 및 속성값을 이용하여 VisualNastran에서 수행하였다. 포워더의 운동은 횡전도를 나타내는 데 필요한 최소한의 자유도를 가지도록 결정하였다. 따라서 자유도는 본체부의 경우에는 무게 중심을 원점으로 한 x, y, z 방향의 병진 운동과 회전 운동, 앞차축부에서는 전륜의 회전 운동과 힌지점에 대한 앞차축의 회전 운동, 보기 차륜부에서는 차륜의 회전 운동과 피봇점에 대한 보기 프레임의 회전 운동을 나타낼 수 있도록 그림 9에서와 같이 총 15 자유도로 하였다.

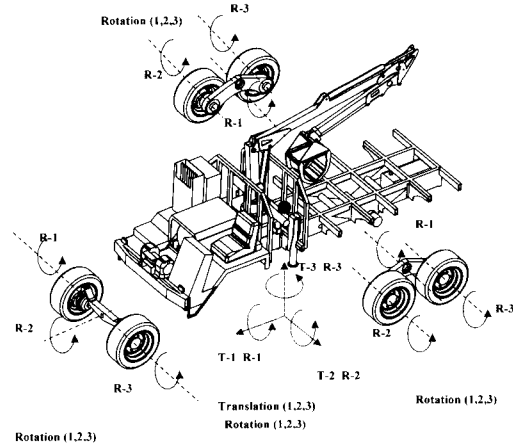


Fig. 9 Degrees of freedom of forwader model.

포워더 모형화와 횡전도 시뮬레이션에서 가정한 주요 사항은 다음과 같다.

- (1) 포워더의 각 구성부는 강체이다.
- (2) 각 구성부를 연결하는 조인트의 마찰은 무시한다.
- (3) 포워더의 무게 분포는 좌우 대칭이다.
- (4) 전륜의 토우인, 캐스터, 캠버각은 무시한다.
- (5) 주행 지면은 평탄하고, 미끄럼이 없다.

포워더가 임지를 주행할 때 충돌하는 장애물은 주로 돌부리이다. 따라서, 장애물은 그림 10에서와 같이 돌부리의 형상을 나타낼 수 있는 사다리꼴 모양으로 하였으며, 크기는 높이가 10 cm이고, 접근각이 135°인 것과 높이가 15 cm이고, 접근각이 124°인 것 2종류로 하였다. 장애물의 높이와 접근각에 따라 장애물이 횡전도에 미치는 영향을 분석하였다.

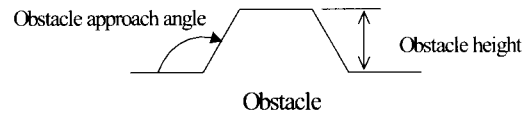


Fig. 10 Height and approach angle of obstacle.

나. 횡전도 시뮬레이션

경사지에서 일어나는 횡전도는 주로 포워더가 등고선 방향으로 주행할 때 경사 위쪽의 후륜이 장애물과 충돌하는 경우이다. 따라서, 본 연구에서도 그림 11에서와 같이 포워더가 등고선 방향으로 주행할 때 경사 위쪽의 보기 차륜이 장애물과 충돌하는 경우를 대상으로 하였다. 이때 지면의 경사각을 각각 10°, 20°, 25°, 30°, 장애물의 높이를

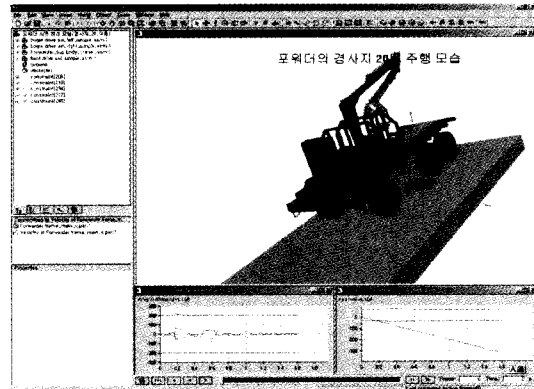


Fig. 11 Simulation of sideways overturning of forwader.

각각 10 cm, 15 cm로 하여 주행 속도와 원목의 적재 여부에 따라 포워더의 경사지 주행 상태를 그래픽으로 시뮬레이션하였다. 즉, 시뮬레이션의 입력 변수는 지면 경사각, 장애물의 높이, 주행 속

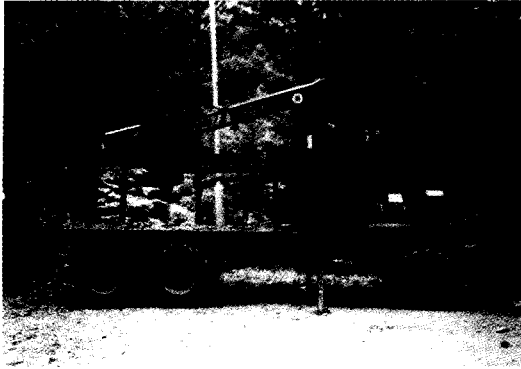


Fig. 12 A view of tandem-axle forwarder.

도, 원목의 적재 여부로 하였으며, 출력은 Visual-Nastran이 동영상 그래픽으로 구현한 포워더의 주행 상태로 하였다. 또한, 같은 운행 조건에서 보기 차륜과 단순 6륜을 부착한 포워더의 안정성을 비교, 검토하였다.

단순 6륜 구동 포워더는 그림 12에서와 같이 tandem axle 방식의 포워더로서, 적재함 밑에 구동륜을 tandem 방식으로 설치하여 적재 원목의 하중을 분산시키고 추진력을 높인 것이다. 그러나, 단순 6륜 구동 포워더는 후차축이 차체에 고정되어 있기 때문에 장애물을 통과할 때 보기 차륜을 장착한 포워더에 비하여 횡전도에 대한 안정성이 낮을 것으로 예상된다.

단순 6륜 구동 포워더는 보기 차륜 포워더 모형에서 보기 프레임이 요동하지 않도록 피벗축을 완전히 고정하는 방식으로 모형화하였다.

포워더가 경사지를 주행할 때 최고 속도와 최대 지면 경사각은 각각 4 m/s, 30°로 설정하였으며, 구동륜의 슬립은 고려하지 않았다. 장애물을 통과할 때 포워더의 속도는 일정하다고 가정하였다.

시뮬레이션에서 횡전도는 별도의 조건을 입력하지 않더라도 모형에 따라 VisualNastran에서 자동적으로 구현된다.

다. 횡전도 시뮬레이션의 검증

VisualNastran이 구현한 횡전도 시뮬레이션의 타당성을 검증하기 위하여 실제 포워더의 정지 횡전각을 측정하고, 이를 같은 조건에서 시뮬레이션한 정지 횡전각과 비교하였다. 실제 포워더의 정지

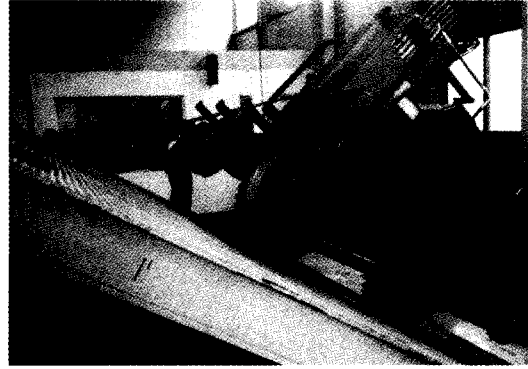


Fig. 13 Measurement of the maximum static angle of sideways overturning of forwarder.

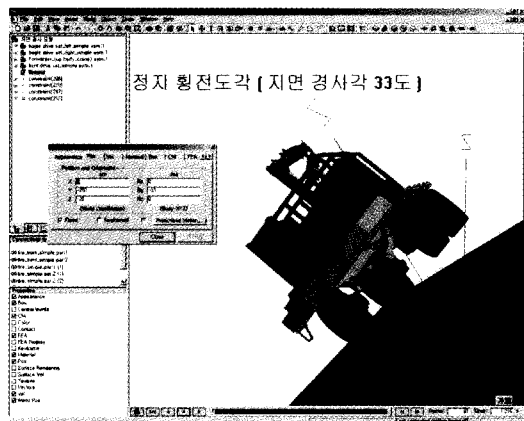


Fig. 14 Predicted static angle of sideways overturning by simulation.

횡전각은 그림 13에서와 같이 지면의 경사각을 변화시킬 수 있는 경사판에 포워더를 정차시킨 후 포워더가 횡전할 때까지 경사판의 경사도를 서서히 증가시켰다. 포워더가 횡전되는 경사각, 즉 정지 횡전각은 33°로 측정되었다.

시뮬레이션에서는 포워더를 지면에 정차시킨 후 엑츄에이터를 이용하여 지면 경사각을 변화시킬 수 있도록 하였다. 즉, 지면의 경사각을 변화시키며 포워더의 횡전도 현상을 시뮬레이션하였다. 포워더는 그림 14에서와 같이 지면 경사각이 33° 되었을 때 횡전도가 시작되었다.

따라서, 시뮬레이션으로 예측한 포워더의 정지 횡전각은 실제 측정된 정지 횡전각과 일치하였다.

5. 결과 및 고찰

가. 포워더의 횡전도 안정성

그림 15는 원목의 적재 여부에 따라, 높이가 10 cm이고 접근각이 135° 인 장애물을 통과할 때 횡전도가 일어나는 포워더의 위험 속도를 나타낸 것이다. 지면 경사각이 20° 미만이고 주행 속도가 4 m/s일 때는 적재 여부에 관계없이 모두 횡전도가 일어나지 않았다. 그러나, 원목이 적재된 상태에서는 주행 속도 4 m/s일 때부터 횡전도가 일어났다. 미적재 상태에서는 경사도 25°, 주행 속도 3 m/s 일 때부터 횡전도가 발생되었다.

지면의 경사각이 증가될수록 횡전도가 일어나는 위험 속도는 원목 적재 여부에 관계없이 모두 선형적으로 감소하였다. 즉, 경사가 심할수록 저속에서도 횡전도가 일어나는 것으로 나타났다. 측면 경사각이 30° 일 때는 적재 여부에 관계없이 모두 주행 속도가 1.5 m/s 이하에서 횡전도가 일어났다.

그림 16은 원목의 적재 여부에 따라, 높이가 15 cm이고 접근각이 124° 인 장애물을 통과할 때 횡전도가 일어나는 포워더의 위험 속도를 나타낸 것이다. 원목을 적재하지 않은 상태에서는 경사각이 10°, 주행 속도가 4 m/s일 때 횡전도가 일어났으며, 적재 상태에서는 경사각이 10°, 주행 속도가 3.5 m/s일 때 횡전도가 일어났다. 측면 경사각이 30° 인 경우에는 적재 상태와 미적재 상태에서 모두 주행 속도가 1 m/s 이하일 때 횡전도가 일어났다.

횡전도 시뮬레이션 결과에 의하면, 원목을 적재하였을 때는 적재하지 않았을 때보다 75%~ 87%의 감속 주행에서도 횡전도가 발생하였다. 즉, 원목을 적재한 상태에서 횡전도를 방지하기 위해서는 주행 속도를 미적재 상태에서보다 20% 이상 감속해야 할 것으로 판단된다.

장애물의 높이가 10 cm에서 15 cm로 33% 증가되었을 때, 횡전도 위험 속도는 63%~67% 감소되는 것으로 나타났다. 이는 장애물의 높이가 높아지면 횡전도에 대한 포워더의 위험 속도는 선형적으로 감소하여 저속에서도 횡전도가 쉽게 일어날 수 있음을 나타낸 것이다.

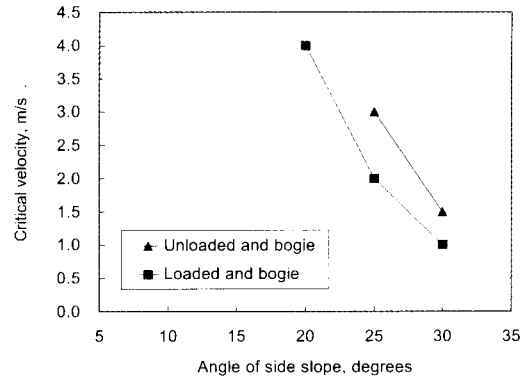


Fig. 15 Slope angle vs. critical velocity of forwarder crossing a 10 cm height obstacle.

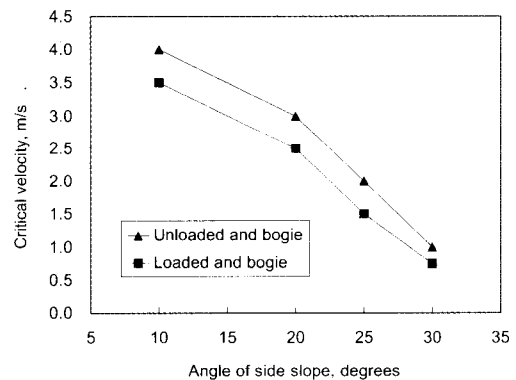


Fig. 16 Slope angle vs. critical velocity of forwarder crossing a 15 cm height obstacle.

나. 보기 차륜에 의한 횡전도 안정성

(1) 미적재 상태

원목을 적재하지 않은 상태에서 보기 차륜과 단순 구동 차륜의 경사지 적응성을 비교하기 위하여 장애물의 크기에 따라 지면 경사각에 대한 포워더의 위험 속도를 시뮬레이션하였다.

그림 17은 높이가 10 cm이고 접근각이 135° 인 장애물을 통과할 때 보기 차륜을 장착한 포워더와 단순 6륜 구동 포워더의 위험 속도를 비교하여 나타낸 것이다. 단순 6륜 구동 포워더의 경우, 지면

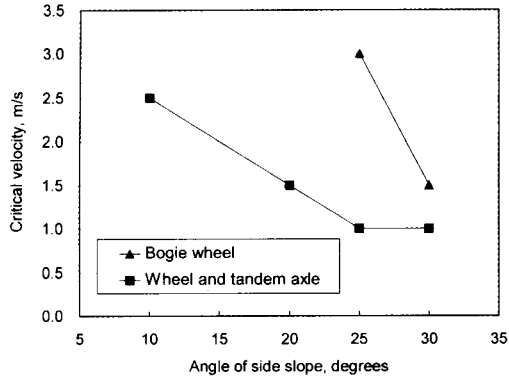


Fig. 17 Slope angle vs. critical velocity of unloaded forwarder crossing a 10 cm height obstacle.

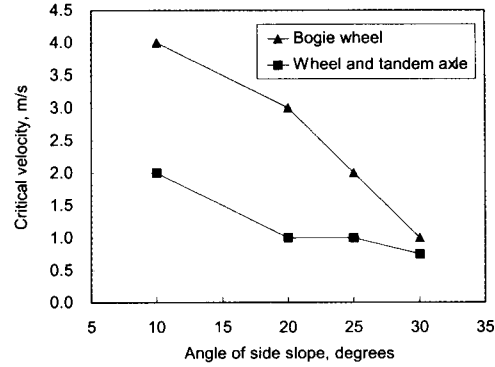


Fig. 18 Slope angle vs. critical velocity of unloaded forwarder crossing a 15 cm height obstacle.

경사각이 10° 이고 주행 속도가 2.5 m/s일 때 횡전도가 일어나기 시작하였으나 보기 차륜을 장착한 포워더의 경우에는 지면 경사각이 25° 될 때까지 횡전도가 일어나지 않았다. 보기 차륜을 장착한 포워더는 지면 경사각이 25°, 주행 속도가 3 m/s일 때 횡전도가 일어났으나, 단순 6륜 구동 포워더는 같은 경사각에서 주행 속도가 1 m/s 일 때 횡전도가 일어났다. 측면 경사각이 30° 일 때는 보기 차륜의 경우 1.5 m/s에서 횡전도가 일어났으나 단순 6륜 구동의 경우에는 그 이하의 속도에서 횡전도가 일어났다. 그러나, 지면 경사각이 30° 이상 일 때는 보기 차륜의 효과도 나타나지 않았다.

그림 18은 높이가 15 cm이고 접근각이 124° 인 장애물을 통과할 때 보기 차륜을 장착한 포워더와 단순 6륜 구동 포워더의 위험 속도를 나타낸 것이다. 지면 경사각이 10° 일 때, 보기 차륜은 주행 속도가 4 m/s일 때, 단순 6륜 포워더는 2 m/s일 때 횡전도가 일어났다. 즉, 장애물이 높은 경사지에서도 보기 차륜이 단순 6륜 포워더보다 횡전도에 대한 안정성이 높은 것으로 나타났다. 측면 경사각이 30° 일 때는 보기 차륜과 단순 6륜 포워더 모두 1 m/s 이하에서 횡전도가 일어났다.

시뮬레이션 결과에 의하면, 원목을 적재하지 않은 상태에서 보기 차륜을 장착한 포워더의 위험 속도는 단순 6륜 포워더에 비하여, 지면 경사각이 25° 이하일 때, 2배 정도 빨랐다. 이는 같은 지형

조건에서, 보기 차륜 포워더가 단순 6륜 포워더에 비하여 횡전도에 대한 안정성이 2배 정도 높다는 것을 나타낸다.

(2) 적재 상태

원목을 적재한 상태에서, 같은 조건으로 보기 차륜을 장착한 포워더와 단순 6륜 구동 포워더의 위험 속도를 비교하였다. 그림 19는 높이가 10 cm 인 장애물을 통과할 때 보기 차륜 포워더와 단순 6륜 포워더의 위험 속도를 나타낸 것이다. 단순 6륜 포워더의 경우에는, 지면 경사각이 10° 이고 주행 속도가 2 m/s일 때 횡전도가 일어났으나, 보기 차륜 포워더의 경우에는 지면 경사각이 20° 이고 주행 속도가 4 m/s일 때 횡전도가 일어났다. 원목을 적재한 상태에서도 보기 차륜을 장착한 포워더는 단순 6륜 포워더에 비하여 횡전도에 대한 안정성이 높게 나타났다. 측면 경사각이 30° 일 때는 두 포워더 모두 1 m/s 이하의 주행 속도에서 횡전도가 발생하여 주행이 어려운 것으로 나타났다.

그림 20은 높이가 15 cm인 장애물을 통과할 때, 보기 차륜 포워더와 단순 6륜 포워더의 위험 속도를 나타낸 것이다. 보기 차륜 포워더의 경우에는, 경사도가 10° 이고 주행 속도가 3.5 m/s 일 때 횡전도가 일어났으며, 단순 6륜 포워더의 경우에는, 경사도가 10° 이고 주행 속도가 1.25 m/s 일 때 횡

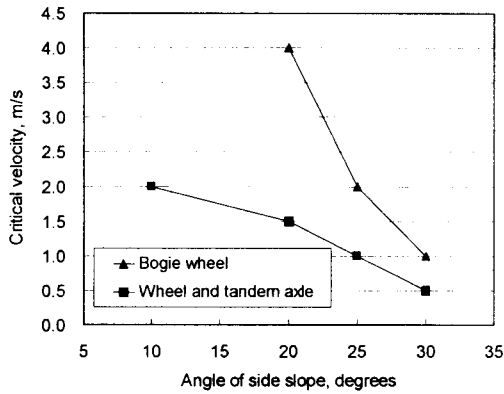


Fig. 19 Slope angle vs. critical velocity of loaded forwarder crossing a 10 cm height obstacle.

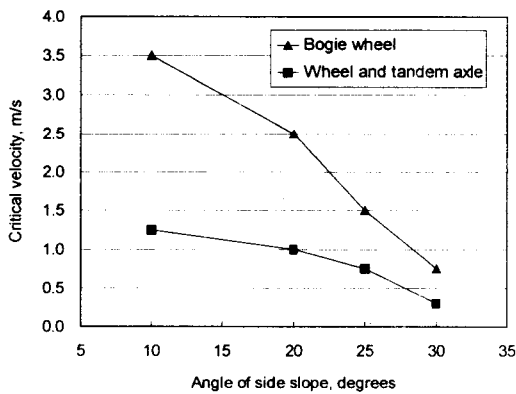


Fig. 20 Slope angle vs. critical velocity of loaded forwarder crossing a 15 cm height obstacle.

전도가 일어났다. 측면 경사각이 30° 일 때는 보기 차륜에서도 0.75 m/s 에서 횡전도가 일어났다.

횡전도 시뮬레이션 결과에 의하면, 원목을 적재한 상태에서도 보기 차륜 포워더의 위험 속도는 단순 6륜 포워더에 비하여, 같은 지형 조건에서, 2~2.7배 빠른 것으로 나타났다. 즉, 보기 차륜에 의하여 횡전도에 대한 포워더의 안정성이 2배 이상 증가된 것이다. 따라서, 보기 차륜은 횡전도를 방지하는 데 큰 효과가 있는 것으로 판단된다.

6. 요약 및 결론

본 연구는 VisualNastran을 이용하여 국내에서 개발된 포워더의 횡전도 안정성을 분석하기 위하여 수행되었다.

동적 거동을 해석하는 데 필요한 포워더의 형상(geometry)과 각 구성 부분의 무게, 무게 중심, 질량관성모멘트는 3D CAD 모델러인 Solid Edge 8.0을 이용하여 모형화하였다.

3차원 횡전도 시뮬레이션을 통하여 포워더가 등고선 방향으로 주행하며 경사 위쪽의 장애물을 통과할 때, 원목의 적재 여부, 주행 속도, 장애물의 크기, 지면 경사각에 따라 횡전도가 일어나는 위험 속도를 추정하였다. 또한, 보기 차륜을 장착한 포워더와 단순 6륜 구동 포워더에 대한 횡전도 안정성을 비교 분석하였다.

횡전도 시뮬레이션 결과에 의하면, 적재 원목은 포워더의 무게 중심을 높여 횡전도에 대한 안정성을 감소시킨다. 따라서, 원목을 적재하고 경사지를 주행하는 보기 차륜 포워더는 원목을 적재하지 않았을 때보다 주행 속도를 20% 이상 감속해야 할 것으로 판단된다. 장애물이 높고 접근각이 작을수록 횡전도의 위험성은 높아지며, 지면 경사도가 20° 이상일 때는 급격히 증가되는 것으로 나타났다.

보기 차륜을 장착한 포워더와 6륜 구동 포워더의 안정성을 비교하면, 원목을 적재한 상태의 보기 차륜 포워더는, 경사도가 20° 미만인 지면에서, 높이가 낮은 10 cm 이하의 장애물을 통과할 때, 규정 속도 이내에서는 횡전도가 일어나지 않았다. 그러나, 단순 6륜 포워더의 경우에는, 원목을 적재하지 않은 상태에서도, 10° 경사지에서 횡전도가 일어났다. 즉, 장애물의 높이가 높으면 6륜 구동 포워더는 낮은 지면 경사도에서도 쉽게 횡전도가 일어났다. 보기 차륜을 장착한 포워더 안정성은 단순 6륜 구동 포워더에 비하여 같은 경사지에서 2배 이상 높은 것으로 나타났다.

본 연구에서 개발된 모형을 이용하면 다양한 운행 조건에서 포워더의 안전 주행 속도를 추정할 수 있을 것으로 판단된다. 또한, 솔리드 모형을 이

용한 안정성 분석 방법은 농업용 트랙터, 로더, 건설 중장비 등 다른 차량에서도 쉽게 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. 김재원. 2001. 원목 원반용 미니 포워더 개발. 임업연구원 연구보고서,
2. 박현기. 2001. 다물체 동력학 해석 프로그램을 이용한 포워더의 안정성 분석. 석사학위 논문. 서울대학교 대학원.
3. 엄정섭, 장원호, 김대일, 오지은. 2001. Solid Edge V8.0. 영진출판사.
4. 현동윤. 1989. 농업용 트랙터의 횡전도에 대한 컴퓨터 시뮬레이션. 석사학위 논문. 서울대학교 대학원.
5. Kim, K. U. and G. E. Rehkugler. 1987. A review of tractor dynamics and stability. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers 30(3):615-623.
6. 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.