

**다물체 동력학 해석 프로그램을 이용한
포워더의 안정성 분석**
Stability Analysis of Forwarder
Using a Multibody Dynamics Analysis Program

박현기*	김경욱*
정회원	정회원
H.K.Park	K.U.Kim

1. 서론

임업 기계의 국산화 추진으로 개발되고 있는 집재 운반용 미니 포워더(mini forwarder)는 인력 위주의 간벌 작업을 기계화하기 위한 장비이다. 포워더는 벌채 후 임지(林地)를 저속으로 주행하며 차량에 탑재된 크레인(crane)과 원목 그레플(grapple)을 이용하여 적재함에 원목을 상차할 수 있다. 포워더는 그 특성상 험한 지형에서 주행하거나 작업하므로 많은 위험 요소를 안고 있다. 이러한 위험 요소는 주로 주행 조건과 차량 자체에서 야기된다. 주행 조건의 위험 요소에는 불량한 임로의 노면, 경사도, 장애물 등이 있다. 차량이 가지고 있는 위험 요소에는 목재를 상차하기 위해 탑재된 크레인, 적재함에 실린 목재, 차량의 최저 지상고 등이다. 이러한 요소는 차량 중심의 지상고를 높이기 때문에 안정성을 감소시킨다.

본 연구는 현재 국내에서 개발되고 있는 미니 포워더의 안정성을 예측하기 위한 것으로서, 구체적인 내용은 다음과 같다.

1. 3D CAD 모델러(modeler)인 Solid Edge 8.0을 이용하여 포워더를 3차원으로 모형화하고, 무게, 무게 중심, 질량관성모멘트 등 모형의 물리적 속성을 결정하였다.
2. 3차원 다물체 동력학 해석 프로그램 VisualNastran Desktop 이용하여 경사지에서 등고선 방향으로 주행하는 포워더의 횡전도 현상을 시뮬레이션하고 횡전도에 대한 안정성을 예측하였다.

2. 재료 및 방법

가. 포워더의 3D 모델링과 물리적 속성 결정

3D CAD 모델러인 Solid Edge를 이용하여 포워더의 3D 모델링과 물리적 속성치를 구하여 실험적으로 결정하기 어려운 포워더의 각 단품에 대한 무게, 무게 중심, 질량관성모멘트 등과 같은 물리적 속성을 결정하고 개발된 모형(geometry)과 물리적 속성(physical properties)을 다물체 동력학 해석 프로그램인 VisualNastran Desktop에 입력하여 시뮬레이션 함으로써 다물체 운동 예측의 정확성과 효율성을 높였다. 포워더의 3D 모형은 크게 본체

* 서울대학교 생물자원공학부 농업기계전공

부, 앞차축부, 보기차륜부, 적재 목재로 나누어 모델링하였으며 각부에 해당하는 물리적 속성도 함께 구하였다 본 연구에서 안정성 분석 대상으로 한 포워더는 그림 1에서와 같고 3D CAD 모델러의 Physical properties 예측 기능을 이용하여 계산한 포워더 모형의 전체 무게 중심 x, y, z축 기준의 물리적 속성과 3D 포워더 모델은 그림 2에서와 같다.

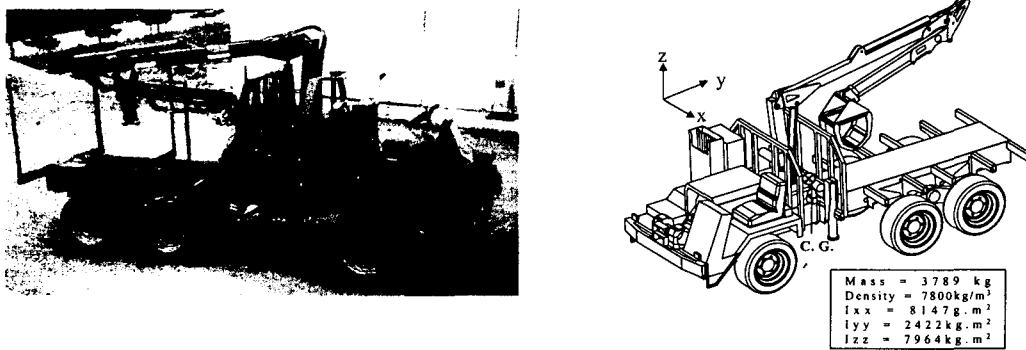


Fig. 1 A view of forwarder under study. Fig. 2 Completed 3D model of forwarder

3D CAD 모델러를 이용하여 모델링하고 예측한 포워더의 형상과 물리적 속성은 다물체 동역학 해석 프로그램에 직접 입력하여 포워더의 주행 안정성 및 횡전도 시뮬레이션에 이용될 수 있다. 그러나 시뮬레이션을 수행하기 전에 예측한 포워더의 물리적 속성에 대한 유효성을 검증할 필요가 있다. 유효성 검증은 실제 포워더를 대상으로 각 구성부의 무게, 포워더의 전체 무게, 무게 중심 등을 측정하고, 3D 모델러로써 예측한 무게, 무게 중심을 각각 비교하는 방법으로 실시하였다. 측정값과 예측값을 비교하였을 때 표 1에서와 같이 최고 9%의 오차가 있었다. 이 정도의 오차 범위 내에서는 모형을 이용하여 포워더의 안정성을 예측하는 데 큰 문제가 없을 것으로 판단하였다.

Table 1 Comparison between measured properties and predicted properties

	실제 측정 값	3D 모델러 예측 값	오차 (%)
구동륜 무게	123 kg _f	122 kg _f	0.8 %
크레인 무게	769 kg _f	779 kg _f	1.3 %
전체무게	3985 kg _f	3789 kg _f	5 %
포워더 무게 중심(수평 거리)	147 cm	149 cm	1.4 %
포워더 무게 중심(수직 거리)	107 cm	96 cm	9 %

나. 포워더의 횡전도 시뮬레이션

경사지에서 횡전도가 일어나기 쉬운 경우는 포워더가 등고선 방향으로 주행할 때 경사 위쪽의 후륜이 장애물과 충돌하는 경우이다. 따라서 본 연구에서도 등고선 방향으로 주행하는

포워더의 경사 위쪽 보기 차륜이 장애물과 충돌할 때 를 그림 3에서와 같이 시뮬레이션하였다. 이때 지면 경사각, 주행속도, 장애물의 높이, 목재의 적재 여부에 따른 횡전도 현상을 예측하였다. 또한 보기 차륜과 단순 차륜을 부착한 포워더의 횡전도 각을 예측하여 두 차량의 안정성을 비교, 검토하였다. 포워더는 총 15 운동 자유도를 가지며, 각 구성부의 자유도는 그림 4에서와 같다. 포워더가 통과 할 장애물은 사다리꼴 모양의 크기가 다른 2개이다. 장애물 1은 높이를 10 cm, 접근각은 135° 이며, 장애물 2는 높이를 15 cm, 접근각은 124° 이다. 장애물의 높이와 접근각을 변화시켜 포워더가 장애물을 통과할 때 장애물의 형상이 안정성에 미치는 영향을 분석하고자 하였다.

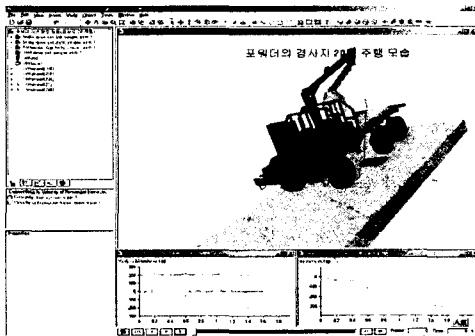


Fig. 3 Simulation of sideways overturning of forwarder.

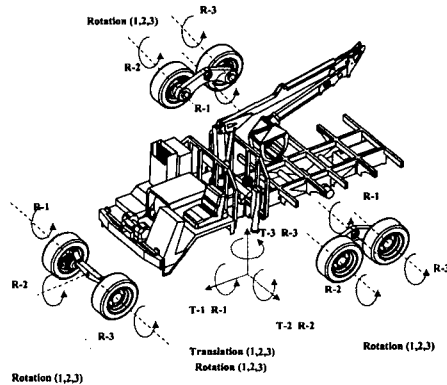


Fig. 4 Degrees of forwarder model.

그림 5는 목재를 적재한 상태에서 장애물을 통과할 때 포워더의 횡전도 현상을 시뮬레이션한 것이다.

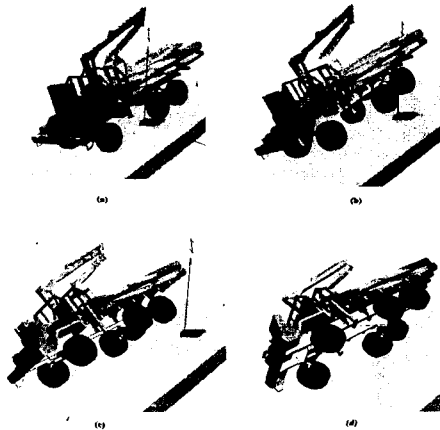


Fig. 5 Sideways overturning of forwarder when at traversed over an up-hill obstacle.

3. 결과 및 고찰

가. 목재의 적재 여부에 따른 횡전도

그림 6과 그림 7은 목재의 적재 여부에 따라 횡전도가 일어나는 포워더의 위험속도를 나타낸 것이다. 횡전도 시뮬레이션 결과에 의하면 목재를 적재하였을 때는 목재를 적재하지 않았을 때에 비하여 75%~87%의 감속 주행에서도 횡전도가 발생하였다. 즉, 목재를 적재한 상태에서 횡전도를 방지하기 위해서는 주행속도를 미적재 상태에서보다 20% 이상 감속해야 할 것으로 판단된다.

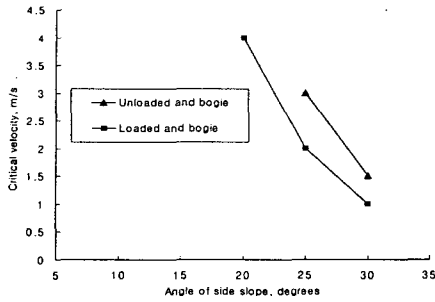


Fig. 6 Velocity at which sideways overturning occurred when forwader traversed over an obstacle of 10 cm height on slope land.

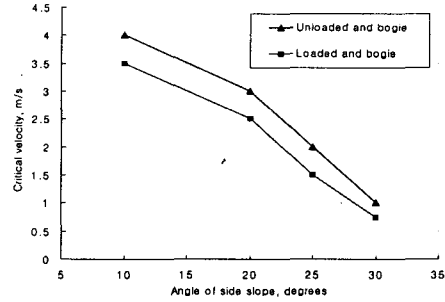


Fig. 7 Velocity at which sideways overturning occurred when forwader traversed over an obstacle of 15 cm height on slope land.

나. 미적재 상태에서 보기차륜의 횡전도 안정성

그림 8과 그림 9는 목재를 적재하지 않은 상태에서 보기 차륜과 단순 차륜의 경사지 적응성을 비교하기 위하여 장애물의 크기에 따라 지면 경사각에 대한 포워더의 횡전도 위험속도를 시뮬레이션하였다. 시뮬레이션 결과에 의하면 목재를 적재하지 않은 상태에서 보기 차륜을 장착한 포워더의 횡전도 위험속도는 단순 6륜 포워더의 위험속도에 비하여 지면 경사각이 25°가 될 때까지는 2배 정도 빨랐다. 이는 같은 지형 조건에서 보기차륜이 단순 6륜 포워더에 비하여 횡전도에 대한 안정성이 2배 정도 증가한다는 것을 나타낸다. 따라서 보기 차륜은 경사지에서 횡전도 방지하는데 유용하게 활용될 수 있는 것으로 판단된다.

다. 적재 상태에서 보기 차륜의 횡전도 안정성

그림 10과 그림 11은 목재를 적재한 상태에서 같은 조건으로 보기차륜을 장착한 포워더와 단순 6륜 구동 포워더의 횡전도 위험속도를 비교하였다. 횡전도 시뮬레이션 결과에 의하면 목재를 적재한 상태에서도 보기차륜을 장착한 포워더의 횡전도 위험속도는 단순 6륜 포워더에 비하여 같은 지형 조건에서 2~2.7배 빠른 것으로 나타났다. 이는 보기차륜에 의하여 단순 6륜 구동 포워더보다 횡전도에 대한 안정성이 2배 이상 증가된 것을 나타낸다. 따라서 보기차륜은 횡전도를 방지하는데 큰 효과가 있는 것으로 판단된다. 반면 단순 6륜 구동 포워더는 목재를 적재한 상태에서 장애물 충돌 시 장애물의 높이가 높으면 낮은 경사지

에서도 쉽게 횡전도 현상이 발생하였다.

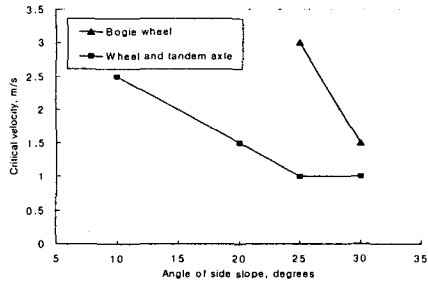


Fig. 8 Velocity at which sideways overturning occurred when unloaded forwarder traversed over an obstacle of 10 cm height on slope land.

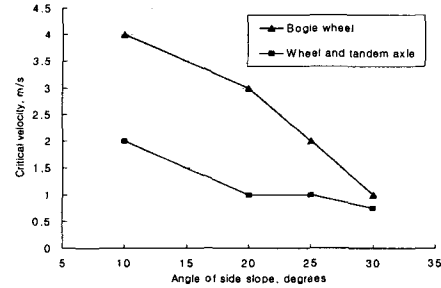


Fig. 9 Velocity at which sideways overturning occurred when unloaded forwarder traversed over an obstacle of 15 cm height on slope land.

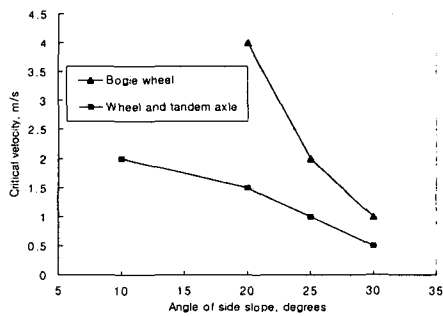


Fig. 10 Velocity at which sideways overturning occurred when loaded forwarder traversed over an obstacle of 10 cm height on slope land.

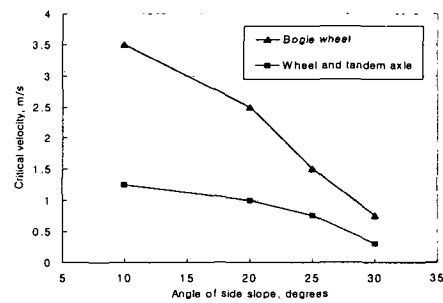


Fig. 11 Velocity at which sideways overturning occurred when loaded forwarder traversed over an obstacle of 15 cm height on slope land.

4. 요약 및 결론

포워더의 안정성 분석을 위하여 다물체 동력학 해석 프로그램인 VisualNastran Desktop를 이용하였다. 동적 거동 해석에 필요한 포워더의 형상(geometry)과 각 구성부의 물리적 속성은 3D CAD 모델러(modeler)인 Solid Edge 8.0을 이용하여 모델링하고 예측하였다.

횡전도 시뮬레이션 결과에 의하면 적재 목적은 포워더의 무게 중심을 높여 횡전도 안정성을 감소시키므로 목적을 적재하고 경사지를 주행하는 보기차륜 포워더는 목적을 적재하지 않았을 때보다 주행속도를 20 % 이상 감속해야할 것으로 나타났다. 장애물이 높고 접근각

이 작을수록 횡전도는 쉽게 일어났으며 지면 경사도가 20° 이상일 때는 횡전도의 위험성이 급격히 증가하는 것으로 나타났다. 보기차륜 포워더는 경사도 20° 미만의 지면에서 높이가 비교적 낮은 10 cm 이하의 장애물을 통과할 때 목재를 적재한 상태에서도 규정속도이내에서는 횡전도가 일어나지 않았다. 반면, 단순 6륜 포워더의 경우 목재를 적재하지 않은 상태에서도 비교적 낮은 경사 10° 에서 횡전도가 일어났으며, 장애물의 높이가 높으면 낮은 지면 경사도에서도 쉽게 횡전도가 일어났다. 예측 결과 보기차륜을 장착한 포워더는 단순 6륜 구동 포워더에 비하여 같은 경사지에서 횡전도에 대한 안정성이 2배 이상 우수하였다. 본 연구에서 수행한 안정성 분석 시뮬레이션을 통하여 다양한 운행 조건에서 포워더의 안전 한계를 제시함으로써 안정성 보완 설계시 참고할 수 있는 기초 자료로 제공될 수 있을 뿐만 아니라 운전자에게는 지형, 주행 조건에 따른 위험 상황을 예고하여 사고를 미연에 방지할 수 있을 것으로 판단된다.

5. 참고 문헌

1. 김경욱. 1991. 농업용 트랙터의 안정성 분석. 한국과학재단.
2. 김경욱. 1999. 야지 기동성 해석 프로그램 개발 연구 및 국내 지형 특성 조사 분석. 국방과학연구소.
3. 정창주, 류관희, 김경욱. 1992. 농업동력학. 문운당.
4. 정주상, 정우담. 1995. 급경사지 산림 작업을 위한 차량의 역학 분석에 관한 연구. 한국임학회지 84(2): 218-225.
5. 현동윤. 1989. 농업용 트랙터의 횡전도에 대한 컴퓨터 시뮬레이션. 서울대학교 대학원 농공학과 석사학위논문.
6. 중원사 자동차 편집부. 1997. 자동차 공학. 중원사.
7. 엄정섭, 장원호, 김대일, 오지은. 2001. Solid Edge V8.0. 영진 출판사.
8. Davis, D. C. and G. E. Rehkugler. 1973. Simulation and model verification of agricultural tractor overturns. Unpublished manual, Department of Agricultural Engineering, Cornell University, Ithaca, NY 14853.
9. Kim, K. U. and H. J. Park. 1993. Modeling static stability of agricultural tractors. Proceeding of international Conference for Agricultural Machinery and Process Engineering. October 19-22, 1993, KOEX, Seoul, Korea. Vol IV: 1127-1136.
10. 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.
11. Malmberg, C. E. 1989. The Off-Road Vehicle Volume 1. The Joint Textbook Committee of The Paper Industry.