

다물체 동역학 프로그램과 ZMP 이론을 이용한 고소작업차량의 전도 안정성 판별에 관한 연구

김상원*, 정창조*, 이정환**,#, 강동명***, 박문호****

*군산대학교 건설기계공학과, **군산대학교 기계융합시스템 공학부, ***군산대학교 기술혁신센터,
****(주)진우에스엠씨

A Study on the Determination of the Tip-Over Stability of High Place Operation Car Using Multibody Dynamics Program and ZMP

Sang Won Kim*, Chang Jo Jung*, Jung-Hwan Lee**,#, Dong-Myeng Kang***, Moon-Ho Park****

*Department of Construction Equipment Engineering Graduate School, Kunsan National University,

School of Mechanical Convergence System Engineering, Kunsan National University, *Kunsan
Advanced Technology Innovation Center, ****Jinwoo SMC Co., LTD.

(Received 21 February 2018; received in revised form 1 April 2018; accepted 5 April 2018)

ABSTRACT

This study deals with the method of determining the tip-over stability of a truck mounted on a high place operation car that is frequently used to carry out high-altitude work. Multibody Dynamics Program and Zero Moment Point (ZMP) theory are used to include dynamic effects during the car's high place operation. Through a combination of the Multibody Dynamics Program and ZMP, understanding the dynamic effects of the car's operating parts and building a detailed tip-over model of the car permitted a more precise prediction of the car's tipping-over behavior. It is also expected to help reduce the car's development time due to the time-effective simulation and provide safer work levels for the operating guide (in terms of working radius and lifting capability) with the dynamics effects.

Key Words : Multibody Dynamics Program(다물체 동역학 프로그램), Zero Moment Point(제로 모멘트 포인트), High Place Operation car(고소작업차), Tip-Over(전도), Stability(안정성)

1. 서 론

1.1 연구배경

고소작업차량은 고소에서 공사, 점검, 보수 등의 작업을 수행하는데 사용되며, 근로자가 높이가 2미터 이

상인 장소에서 작업하기 위하여 작업자가 탈 수 있는 작업대가 상승, 하강하는 장치로 구성되어있다. 고소 작업차량을 이용한 작업 수행 시 전도는 주로 동적 영향에 의해 발생한다. 정적인 영향만을 고려하여 작성된 작업하중 표나 작업반경 표에 따라 작업을 수행 하더라도 동적인 영향을 파악하지 못하면 전도를 미연에 방지하기 어려울 수 있다. 또한 붐의 길이나 각도에 따라 정격 총 하중 초과에 의한 전도 및 파괴를

Corresponding Author : jhleeme@kunsan.ac.kr
Tel: +82-63-469-4740

방지하기 위하여 과부하방지장치가 개발되어 크레인 등에 사용되고 있지만 이는 각 구성요소에 작용하는 동적 영향을 고려하지 못한다.^[1] 따라서 본 연구에서는 고소작업차량에 대하여 전도를 구사할 수 있는 다물체 동역학 해석용 모델을 구성하였다. 다물체 동역학 모델은 전체 기계 시스템 내에서 기계 부품간의 영향을 파악할 수 있고 특정 경계조건이 시스템 전체에 미치는 영향을 거시적으로 확인할 수 있는 장점이 있다. 제품의 개발 및 설계 변형 단계마다 시험을 할 수 있는 시간이나 자원이 한정적이기 때문에, 작업 환경을 모사하여 시뮬레이션을 수행함으로써 시험을 대체할 수 있는 것 또한 다물체 동역학 해석의 이점이다.^[2] 최근 건설장비의 자동화 트렌드에 따라 원격 및 자동 건설장비가 개발되고 있는데, 자동화 기계의 개발에 있어 안전성의 확보는 매우 중요하다. 따라서 본 연구는 구성된 다물체 동역학 모델과 Zero Moment Point(이하 ZMP) 이론을 이용하여 건설장비의 안전성 확보에 기여하고자 수행되었다.

1.2 연구방법 및 목적

본 연구에서는 먼저 대상 모델의 전도 안정성을 일반적인 안정성 이론을 바탕으로 어떤 기준에 의하여 판별할 것인지 선정하였다. 트럭 탑재형 고소작업차량에 대하여 다물체 동역학 해석용 모델을 구성하였고, 구성된 모델이 고소작업부에 주어진 동적 운동조건에 따라 전도를 구사할 수 있는지 확인하였다. 시뮬레이션 결과를 ZMP 이론에 적용하여 시스템의 전도 안정성을 다시 확인하였고, 시뮬레이션 결과와 비교하여 구성된 모델의 신뢰성을 높였다. 다물체 동역학 시뮬레이션이 개발단계나 설계개산단계에 있는 시스템의 안정성 확보에 어떻게 도움이 될 수 있는지, 기존의

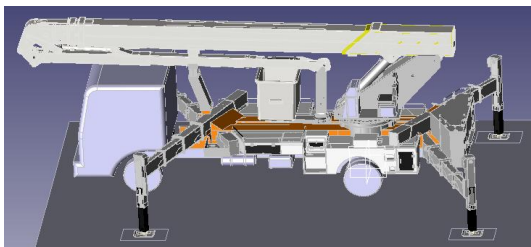


Fig. 1 Model of high place operation car for multi-body dynamics analysis

전도방지장치의 한계를 어떻게 개선할 수 있는지 제시하는 것을 목표로 본 연구가 수행되었다.

2. 전도 안정성 판별 기준 선정

일반적으로 안정성은 안정, 중립적 안정, 불안정 세 가지로 구분된다.^[3] 본 연구에서 사용할 대상 고소작업차량의 전도 안정성을 구분하기 위하여 선정한 기준은 다음과 같다.

아웃트리거가 지면에서 떨어지지 않고 고소작업차량이 정지 상태에 있는 것처럼 보이는 상태를 안정 상태라 하고, 아웃트리거가 지면에서 떨어지나, 시스템의 무게중심이 회전의 중심을 넘지 못하고 원점으로 복귀하는 상태를 중립적 안정 상태라고 한다. 그리고 아웃트리거가 지면에서 떨어지고, 시스템의 무게중심이 회전의 중심을 넘어서 더 이상 하중이 작용하지 않아도 전도가 진행되는 상태를 불안정 상태라고 한다.

실제 작업현장에서 고소작업차량 시스템이 중립적 안정 상태에 있다면, 이는 자칫 잘못하면 안전사고로 이어질 가능성이 매우 크다. 따라서 본 연구에서는 중립적 안정 상태도 불안정한 상태라고 간주하여 고소작업차량의 전도 안정성을 판별하는 기준을 안정, 불안정(+중립적 안정) 두 가지로 선정하였다.^[4]

3. 대상 시스템 모델링

고소작업차량 시스템의 3D CAD 모델은 국내 고소작업차량 제작 업체로부터 제공받은 모델을 사용하되, 시뮬레이션에 영향을 주지 않는 부품들은 형상과 치수 및 물성 값들을 단순화 하였다. 차량의 기본 모델은 국내 5톤 상용트럭이며 2단 굴절붐과 3단 텔레스코픽 붐으로 구성된 16m급 고소작업차용의 특장부가 장착된 시스템이다. 다물체 동역학 해석용 모델은 다물체 동역학 상용프로그램인 DAFUL을 이용하여 Fig. 1과 같이 구성하였으며, 차량의 새시 및 바디의 경우, 현가장치나 차체 마운팅 부 등은 조인트는 세부적인 모델링을 하지 않고 해석의 간단화를 위하여 프레임과의 일체 형태로 구성하였다. 고소작업 특장부의 각 조인트는 저차대우를 이용하여 부품사이의 기구학적 관계를 정의하였다. 지면과 아웃트리거 사이는 전도를

Table 4 Operating conditions in Case 3 for impending tipping-over

Angle of telescopic boom (deg)	0
Extension length of telescopic boom (mm)	0
Rotating angle of the turntable (deg)	0 to 180
Maximum rotating speed for stable condition (rad/sec)	0.066π

구사하기 위하여 Contact으로 관계를 정의하였으며, 아웃트리거와 지면사이의 마찰계수는 0.5로 지정하였다. 턴테이블의 회전, 붐의 신장 및 각도변화는 Motion Function을 이용하여 구사하였다.^[5]

4. 대상모델 시뮬레이션

구성한 다물체 동역학 해석용 모델의 동적 시뮬레이션을 수행하여 구성된 시스템이 전도를 구사할 수 있는지 확인하였다. 시뮬레이션을 위한 초기 기본 조건은 Table 1에 표시하였다. 이 초기조건으로부터 다양한 작업조건에 대해 시뮬레이션을 실시하였다.

시스템을 구성하는 구성요소들의 위치, 속도 및 가속도와 같은 작업조건이 시스템 전체에 어떤 영향을 미치는지 확인하기 위하여 세 가지 작업조건을 선정하여 시뮬레이션 결과를 나타내었다. 즉, 붐의 각도가 75°일 때 턴테이블이 180° 회전하는 경우(Case 1), 붐의 각도를 75°에서 0°로 낮추는 경우(Case 2), 붐의 각도가 0°일 때 턴테이블이 180° 회전하는 경우(Case 3)이다. 이 세 가지의 조건과 이 작업과정에서 전도가 발생하는 작동 조인트의 회전 속도를 Table 2 ~ Table 4에 나타내었다. 시뮬레이션을 통하여 이 세 가지의 조건과 이 작업과정에서 안전하게 작업을 수행할 수 있는 작업 조건을 구하였으며, 시뮬레이션을 수행한 결과 각 작업조건에서 전도가 발생하는 모델의 경계조건을 Table 2 ~ 4와 같이 나타내었다.

Table 1 Initial base configuration of simulation model

Articulated Angle of inflection boom (deg)	165
Load on the basket (kg)	450
Weight of high place operation device (kg)	11480
Weight of truck (kg)	5190
Extension length of outrigger (mm)	2100
Height of outrigger (mm)	700

Table 2 Operating conditions in Case 1 for impending tipping-over

Angle of telescopic boom (deg)	75
Extension length of telescopic boom (mm)	8000
Rotating angle of the turntable (deg)	0 to 180
Maximum rotating speed for stable condition (rad/sec)	0.2π

Table 3 Operating conditions in Case 2 for impending tipping-over

Lowering angle of telescopic boom (deg)	75 to 0
Extension length of telescopic boom (mm)	0
Angle of the turntable (deg)	0
Maximum rotating speed for stable condition (rad/sec)	0.33π

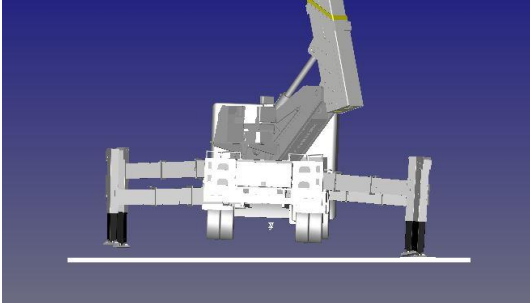


Fig. 2 Roll-over of high place operation car

5. Zero Moment Point 이론

ZMP이론은 건설기계 장비에 성능 향상을 위하여 종종 이용되었다. 즉, 굴삭기를 이용한 크레인 작업시 운전자가 굴삭기의 안전성 여부를 모니터링이나 부저를 통해 확인하고 운전자 및 작업환경의 안전성을 확보하기 위한 연구에 이용되었고,^[7] 안전성판단 알고리즘 기반 원격 굴삭로봇의 전도방지 제어시스템 개발에서 ZMP 이론을 이용하여 굴삭기의 작업조건에 따라 시스템의 ZMP를 계산하고 안정 범위를 벗어나면 안정범위 이내에서 작업을 수행할 수 있도록 제어하는 연구에 이용되었다.^[8]

ZMP는 대상 시스템의 하부체 바닥의 기준 좌표계에 대하여 시스템의 관성력, 중력, 외력 등에 의한 모멘트의 합이 0인 평면상의 점이라고 정의하고 다음과 같이 유도한다.^[6]

Fig. 3은 기준 좌표계 O-XYZ에서 질점에 대한 벡터의 관계를 나타낸다.

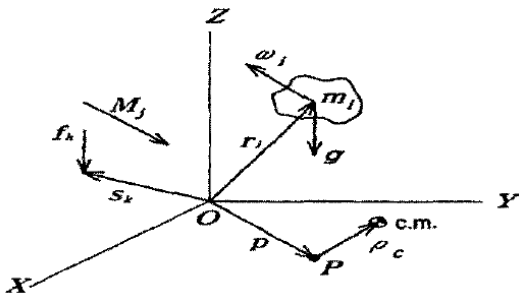


Fig. 3 Definition of vectors for system

임의의 질점 P에 대하여 D'Alembert 법칙을 적용하여 운동방정식을 유도하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\sum_i (r_i - p) \times m_i (\ddot{r}_i + g - \dot{p}) + \rho_c \times m p + \sum_i T_i - \sum_j M_j - \sum_k (s_k - p) \times f_k = M_p \quad (1)$$

임의의 점 p에 대한 질량중심의 위치벡터 ρ_c 는 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\rho_c = \frac{1}{m} \sum_i m_i (r_i - p) \quad (2)$$

여기서 m은 각 질점의 질량의 합을 나타낸다. 식 (2)를 식 (1)에 대입하여 정리하면 다음 식과 같다.

$$\sum_i (r_i - p) \times m_i (\ddot{r}_i + g) + \sum_i T_i - \sum_j M_j - \sum_k (s_k - p) \times f_k = M_p \quad (3)$$

임의의 점 P가 ZMP라고 하면, 위치벡터는 $P = P_{ZMP} = [x_{ZMP}, y_{ZMP}, 0]^T$ 이고, 모멘트의 합은 $M_p = [0, 0, M_z]^T$ 이다. 따라서 ZMP에 대한 성분을 정리하면 식 (4)와 같다.

$$\begin{aligned} x_{ZMP} &= \frac{(\sum_i m_i (\ddot{z}_i + g_z) x_i - \sum_i m_i (\ddot{x}_i + g_x) z_i - \sum_j T_{yj} + \sum_j (s_{zj} f_{xj} - s_{xj} f_{zj}))}{(\sum_i m_i (\ddot{z}_i + g_z) - \sum_j f_{zj})} \\ y_{ZMP} &= \frac{(\sum_i m_i (\ddot{z}_i + g_z) y_i - \sum_i m_i (\ddot{y}_i + g_y) z_i - \sum_j T_{xj} + \sum_j (s_{yj} f_{zj} - s_{zj} f_{yj}))}{(\sum_i m_i (\ddot{z}_i + g_z) - \sum_j f_{zj})} \end{aligned} \quad (4)$$

식 (4)에서 외부에서 모멘트와 힘이 작용하지 않는다고 가정하면 ZMP에 대한 성분 식은 아래와 같이 정리된다.

$$x_{ZMP} = \frac{\sum_i m_i (\ddot{z}_i + g_z) x_i - \sum_i m_i \ddot{x}_i z_i}{\sum_i m_i (\ddot{z}_i + g_z)}$$

$$y_{ZMP} = \frac{\sum_i m_i (\ddot{z}_i + g_z) y_i - \sum_i m_i \ddot{y}_i z_i}{\sum_i m_i (\ddot{z}_i + g_z)} \quad (5)$$

동적 요소를 고려하지 않고 시스템의 정적 ZMP를 계산한다면, 각 x, y, z 방향 가속도의 값은 0이 되어 소거된다. 소거되는 항에 0을 대입하여 식을 정리하면 다음과 같다.

$$x_{ZMP} = \frac{\sum_i m_i g_z x_i}{\sum_i m_i g_z}, \quad y_{ZMP} = \frac{\sum_i m_i g_z y_i}{\sum_i m_i g_z} \quad (6)$$

고소작업차량 아웃트리거의 지면 지지점 내부에 시스템의 ZMP가 존재하면 안정 상태이고, 지면 지지점 외부에 시스템의 ZMP가 존재하면 불안정 상태가 된다고 간주한다.

6. 시뮬레이션 결과의 ZMP 이론 적용

식 (5)에 따라 ZMP 이론을 이용하기 위해서는 시스템을 구성하는 구성요소 무게중심의 x, y, z좌표와 x, y, z방향 가속도를 알아야 함을 알 수 있다. 위치좌표와 가속도 데이터를 실제 차량에서 입수하려면 차량의 각 구성요소에 위치, 가속도센서를 부착하여야 하는데, 다물체 동역학 시뮬레이션을 이용하면 센서 부착, 실시간 데이터 통신 등의 과정을 거치지 않고 이러한 데이터를 입수할 수 있다는 장점이 있다. 따라서 DAFUL 시뮬레이션 결과로 구한 시뮬레이션 모든 step의 위치 데이터와 가속도 데이터를 앞장의 식 (5)의 각 항에 대입하여 매 순간 시스템의 ZMP를 계산하였고, 이를 그래프로 작성하여 시스템의 ZMP 이동경로를 확인하였다. Fig. 4~10의 그래프는 시스템을 위에서 내려다 본 평면도를 도식화 하여 나타낸 좌표 평면이다. 그래프 위의 빨간 점은 아웃트리거의 지면 지지점을 나타낸다. 앞서 수행한 각 경계조건(Case1~3)별 ZMP 이동경로는 안정한 작업조건과 불안정한 작업조건(안전 작업속도보다 빠른 속도로 작업할 때)에 따라 Fig. 4~9와 같다. 또한 각 구성요소에 작용하는 동적인

영향을 고려하지 않고 정적 요소만 고려하여 Case 2의 ZMP를 계산한 결과는 Fig. 10과 같다. ZMP의 이동경로가 빨간점을 이은 구역을 기준으로 내부에 위치하면 안정, 외부에 위치하면 불안정으로 판단한다.

Fig. 5의 경우 시뮬레이션 결과에서 시스템의 아웃트리거가 지면에서 떨어지고 원점으로 복귀하나, 중립적 안정도 불안정으로 간주하기로 하였기 때문에 불안정 상태로 간주한다.

Fig. 9의 경우 시스템의 ZMP가 아웃트리거의 지면 지지점을 벗어나지 않으나 궤적이 작업 방향과의 유사성이 없어 ZMP만으로 전도 안정성을 판별할 수 없다. 그러나 시뮬레이션 결과에서 아웃트리거와 지면 사이에 슬립이 발생하기 때문에 불안정 상태로 간주한다.

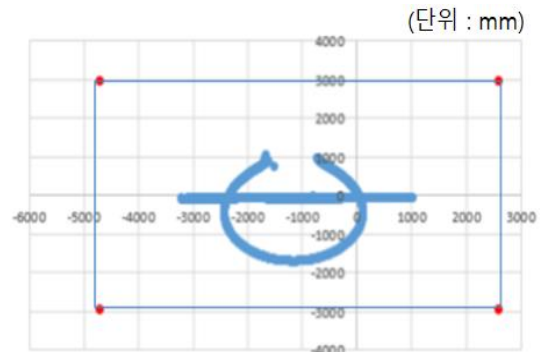


Fig. 4 ZMP trajectory of Case 1 - stable

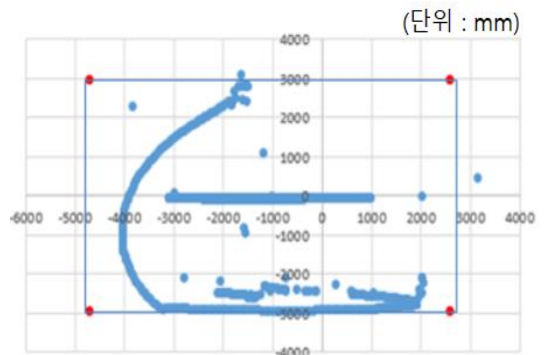


Fig. 5 ZMP trajectory of Case 1 - unstable

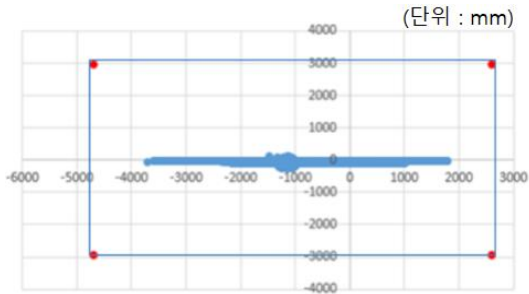


Fig. 6 ZMP trajectory of Case 2 - stable

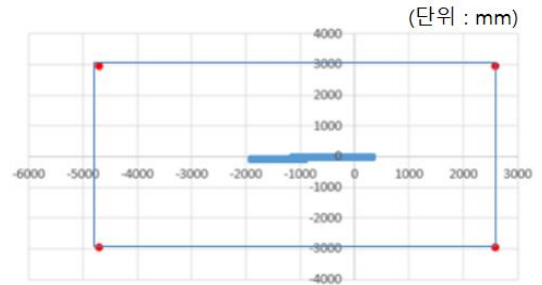


Fig. 10 ZMP trajectory of Case 2 - static

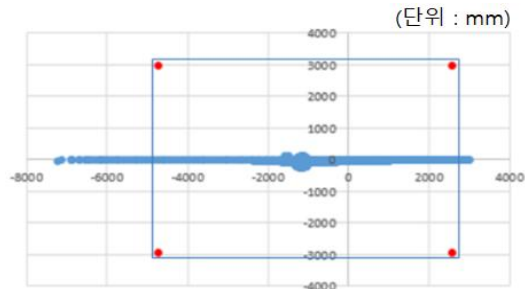


Fig. 7 ZMP trajectory of Case 2 - unstable

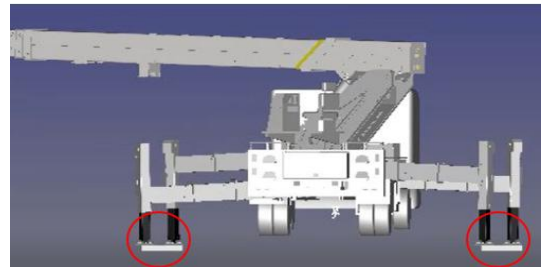


Fig. 11 Slip occurring in an outrigger

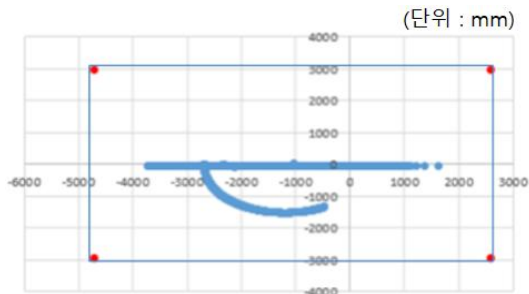


Fig. 8 ZMP trajectory of Case 3 - stable

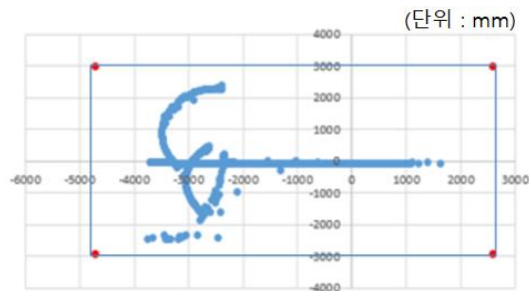


Fig. 9 ZMP trajectory of Case 3 - unstable

Fig. 7과 Fig. 10을 비교해보면 정적으로는 안정한 작업이라고 판단할 수 있는 작업에 대하여 동적 요소를 고려하여 해석하면 불안정한 작업으로 판단할 수 있음을 알 수 있다. 따라서 시스템의 전도 안정성을 판별함에 있어 동적인 요소를 계산하기 위한 다물체 동역학 해석은 필수적이라고 할 수 있다.

4장에서 동역학 시뮬레이션을 수행한 결과와 시스템의 ZMP 이동경로를 비교하여 안정한 작업조건에서는 시스템의 ZMP가 아웃트리거의 지면 지지점 내부에 위치하고, 불안정한 작업조건에서는 시스템의 ZMP가 아웃트리거의 지면 지지점 외부에 위치하는 것을 확인하였다. 시스템의 전도 안정성에 대하여 시뮬레이션 결과와 ZMP 궤적이 의미하는 결과가 일치하므로 구성된 동역학 해석 모델이 신뢰할 수 있는 모델이라고 판단할 수 있다. DAFUL 시뮬레이션 결과를 통해 거시적으로 시스템의 동적 거동을 확인할 수는 있으나 정확히 어느 시점에서, 어느 작업을 수행할 때 불안정해지는지 알기 힘든 단점이 있다. 그러나 매 순간의 전도 안정성을 계산하여 그래프로 작성된 ZMP 궤적을 이용하면 정확히 어느 순간부터 시스템이 불안정해지는지 확인할 수 있다.

7. 결론

본 연구는 건설기계 중 트럭 탑재형 고소작업차량을 선정하여 다물체 동역학 시뮬레이션을 수행하고 ZMP 이론에 동적 해석 결과를 적용하였다. 이와 같이 다물체 동역학 해석 프로그램 DAFUL과 ZMP 이론을 결합함으로써, 고소작업장치의 운동에 의한 동적 효과를 반영할 뿐 아니라 전도 시뮬레이션 시 더 정밀한 결과를 얻을 수 있는 신뢰성 있는 전도 시뮬레이션이 가능함을 알 수 있었다. 본 연구를 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

1. 전도 안정성 판별을 위한 시뮬레이션을 수행하기 위하여 다물체 동역학 프로그램을 이용하여 대상 트럭 탑재형 고소작업차량의 다물체 동역학 해석용 모델을 구성하였다. 경계조건을 달리하여 구성한 모델의 동역학 해석을 수행하였고, 충분히 시스템의 전도를 구사할 수 있음을 확인하였다.
2. 해석 결과를 통해 시스템의 각 구성요소 무게중심의 위치 및 가속도 정보를 얻었으며, 이를 ZMP 이론에 적용하였을 때 시뮬레이션 결과와 이론값이 일치함을 확인함으로써 시뮬레이션 결과에 대한 신뢰성을 확보하였다. 또한 시스템이 불안정해지는 시점을 DAFUL에서 명확히 알 수 없다는 점을 ZMP 궤적을 확인하여 어느 작업 시점 및 조건에서 시스템이 불안정해지는지 파악하고 이를 DAFUL에서 거시적으로 확인할 수 있음을 입증하였다. 따라서 DAFUL 시뮬레이션과 ZMP 이론을 동시에 이용하면 상호 보완적인 효과를 얻을 수 있다.
3. 정적인 요소만 고려하여 계산한 ZMP 궤적과 동적 요소까지 고려하여 계산한 ZMP 궤적을 비교함으로써 정적인 상태에서 안정하다고 판단할 수 있는 작업에 대하여 동적인 상태에서는 불안정하다고 판단할 수 있음을 보였다.
4. 다물체 동역학 프로그램과 ZMP 이론을 병합함으로써 다물체 동역학 프로그램의 시뮬레이션 결과에서 보기 어려운 거시적인 동적 거동의 경향을 파악할 수 있음을 알았다.

5. ZMP 이론상 안정과 불안정을 판별하는 경계는 임계점을 의미하는데, 여기에 안전계수를 도입하여 실제 작업 환경에서 보다 안전한 작업 조건을 제시할 수 있다.

고소작업차량 뿐만 아니라 굴삭기, 크레인 등 전도에 의한 안전사고 소식을 드물지 않게 접할 수 있다. 다물체 동역학 해석과 ZMP 이론을 이용할 경우 보다 안전한 작업 조건을 제공할 수 있을 뿐 아니라, 고소작업 차량의 개발 단계에서도 작업 조건에 따른 전도 안정성 해석이 용이하여 보다 안전한 차량을 더 빠른 시간에 개발할 수 있으리라 판단된다.

후 기

“이 논문은 산업통상자원부와 한국산업기술진흥원이 지원하는 경제협력권산업 육성사업(R0004526)과 건설기계 R&D 전문인력양성 사업(N0001292)의 일부 지원받아 수행되었습니다.”

REFERENCES

1. Choi, S. B., Industrial Safety Dictionary, Gold, Seoul, Korea., 2004.
2. Park, J. S., Lee, K. W., Cho, C. Y., Yoon, J. W., Shin, J. Y., “Flexible Body Dynamics Analysis of Agricultural Tractor Using 4-Post Road Simulator”, Transaction of the KSME. C, Vol.3 No.2, 2015
3. Jung, H. S., MATLAB control system analysis and design, ajin, Seoul, Korea., 2012
4. Kim, S. W., Lee, J. H., Chang, S. M., Kang, S. H., Cho, J. S., Kim, H. G., “Evaluation of Stability about Roll-Over of Truck Crane Using Multi-Body Dynamics Software”, Proc. of the KSME, Spring and Autumn Conference, Vol.2017 No.5, 2017
5. DAFUL, version 6.0 manual, Virtual motion Inc.
6. Um, H., Choi, J. H., Kim, S. S., Yang, S. Y.,

- Lee, J. G., “A Study on Reversal Stability of Hydraulic Excavator for Crane Work”, Transaction of the Korean Society of Machine Tool Engineers, Vol.13 No.4, 2004.
7. Lee, H. S., 2009, “A Study on Development of Intelligent Hydraulic Excavator System with Crane Function”, Ulsan University Doctoral Thesis.
 8. Moon, S. M., 2009, “Development of Turover Prevention Control System for Tele-Operated Excavator Robot Based on Stability Estimation Algorithm”, Korea University Master’s Thesis.
 9. Sardain, P., Bessonnet, G., “Zero Moment Point-Measurements From a Human Walker Wearing Robot Feet as Shoes”, IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Vol.34 No.5, 2004.
 10. Choi, D., Kim, M., Oh, J. H., “Development of a Rapid Mobile Robot with a Multi-Degree-of-Freedom Inverted Pendulum Using the Model-Based Zero-Moment Point Stabilization Method”, Advanced Robotics, Vol.26 No.5-6, 2012.
 11. Kim, S. S., Vehicle Dynamics, Jinsaem Media, Seoul, Korea., 2002.
 12. Park, H. G., Jang, J. S., Yoo, W. S., Kim, M. S., Lee, H. J., Lee, J. W., “Development of a Design Support Program for Pivot Points of Working Devices in Construction Equipment using Planar Multi-body Dynamic Analysis”, Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol.14 No.6, 2015.
 13. Lee, J. Y., Cho, J. S., Lee, S. J., “A Study on the Stability of Dynamic Walking of a Humanoid Robot”, Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol.15 No.2, 2016.