

# 유압 굴삭기의 크레인 작업시 전도 안정성에 관한 연구

엄 혁<sup>+</sup>, 최종환<sup>+</sup>, 김승수<sup>++</sup>, 양순용<sup>\*</sup>, 이진걸<sup>+++</sup>

(논문접수일 2004. 3. 30, 심사완료일 2004. 4. 29.)

## A Study on Reversal Stability of Hydraulic Excavator for Crane Work

Um Hyuk<sup>+</sup>, Choi Jong-Hwan<sup>+</sup>, Kim Seung-Soo<sup>++</sup>, Yang Soon-Yong<sup>\*</sup>, Lee Jin-Gul<sup>+++</sup>

### Abstract

In this paper, the dynamic stability of a hydraulic excavator using ZMP concept is considered. When a load is moved in an excavator based on automation, an excavator often loses the stability and falls over. This is because a dynamic element is not included in the moment equilibrium equation that is used in order to judge a reversal. Consequently, reversal distinction algorithm including all a static and a dynamic element along a load movement in crane work is necessary. Zero Moment Point(ZMP) is a point on the floor where the resultant moment of the gravity, the inertial force of the manipulator and the external force is zero. This study is going to interpret the reversal stability of the excavator to which is applied ZMP concept through simulation.

**Key Words :** Hydraulic Excavator(유압 굴삭기), Zero Moment Point(ZMP), Dynamic Stability(동적 안정성), Reversal(전도)

## 1. 서론

유압 굴삭기는 기계 자체가 갖는 기구학적 유연성과 유압을 이용한 고회력 때문에 건설, 농업, 임업 그리고 해저 등 다양한 옥외작업에서 그 역할과 기능이 점차 확대되고 있다. 그러나 일반적으로 위험하고 열악한 작업환경 탓으로 갈수록 유압 굴삭기를 조정하기 위한 숙련자의 수는 줄

고 있는 실정이며, 또한 숙련자를 훈련시키기 위해서는 많은 시간과 비용이 요구된다. 이에 따라 다양한 작업 조건들에 대응할 수 있도록 원격조정, 로봇화 및 지능화 등을 비롯한 유압 굴삭기의 자동화가 현실적인 문제로 대두되고 있다<sup>(1,2)</sup>.

유압 굴삭기는 유압회로에서의 비선형성과 작업장치의 상호 작용하는 연성, 운동위치에 따른 기구학적 및 역학

+ 부산대학교 대학원 지능기계공학과  
++ 울산대학교 RRC  
\* 교신저자, 울산대학교 기계·자동차공학과 (soonyy@mail.ulsan.ac.kr)  
주소: 680-749 울산광역시 남구 무거2동 산29  
+++ 부산대학교 기계공학부

적 관계 파라미터들의 시변성 등이 존재하므로 작업장치의 운동제어를 위하여 빠르고 정밀한 강인한 궤적추종 제어기 개발이 필요하다<sup>(3)</sup>. 작업장치 운동제어를 기반으로 자동화 크레인 작업시 고려되어야 할 분야는 과도한 부하에 의한 유압 굴삭기의 전도 안정성에 대한 해석이다.

일반적으로 전도 안정성 문제는 정적인 상태에서 모멘트 방정식을 적용하여 해석하고 있다. 이 경우 부하 이동에 의해 발생하는 관성력은 포함되지 않아 예기치 못한 전도 사고가 발생된다. 따라서 정적인 상태 및 동적인 상태를 모두 고려한 전도 안정성 판별 알고리즘이 필요하다<sup>(4)</sup>.

Zero Moment Point(ZMP)는 대상 시스템에 작용하는 모든 힘에 의한 모멘트의 합이 영인 평면상의 점이라고 정의한다<sup>(12)</sup>. 일반적으로 ZMP 이론은 기존의 바이패드 로봇 연구에서 안정적인 거동에 관한 해석으로 적용하고 있다<sup>(5-10)</sup>. Yamaguchi 등<sup>(5)</sup>은 예상 ZMP 성분을 미리 설정하여 만족시킬 수 있는 트렁크의 궤적을 구하였고, 안정성을 향상시키기 위해 트렁크의 롤링 및 요잉 모멘트를 사용하였다. Sorao 등<sup>(6)</sup>은 기준 입력 ZMP와 측정된 ZMP와의 오차 값을 제어함으로써 보행의 안정성을 증명하였다. 그러나 ZMP에 대한 정확한 궤적을 얻지 못하여 보행에 있어서의 유연성은 떨어진다. 이 경우 로봇의 경우 인간의 보행에서와 같이 트렁크의 운동을 유연적으로 하기 위해서는 ZMP의 위치를 발바닥 영역 안의 적절한 위치로 선정하여야 한다. 즉, ZMP의 위치는 시간에 대한 함수로 표현되어야 하나, ZMP를 로봇의 보행에 따라 적절히 위치시킨다는 것은 쉽지 않은 문제이다.

ZMP 이론에서는 임의의 안정영역을 설정하고 ZMP가 설정된 영역 내에 존재하면 대상 시스템은 안정 상태가 되고 설정된 영역을 벗어나면 불안정 상태가 된다.

본 연구에서는 유압 굴삭기의 자동화 크레인 작업시 ZMP 이론을 적용하여 전도에 대한 안정성 해석을 제안한다. 임의의 부하에 대하여 모멘트 방정식을 적용한 결과와 비교하여 작업시간에 따른 전도 상황을 예측하고 또한 임의의 작업시간에 대하여 부하 변동에 대한 안정성을 해석하고자 한다. 작업 조건은 수평과 수직 작업으로 설정하고 시뮬레이션을 통하여 부하를 포함한 동적 요소가 전도에 미치는 영향을 고찰하도록 한다.

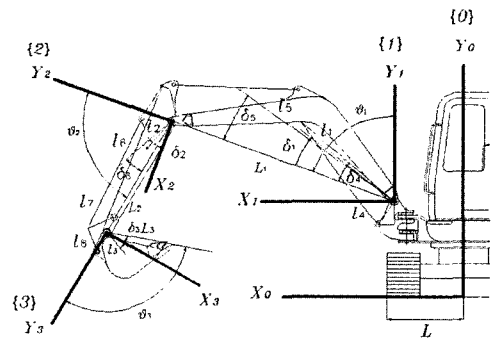
## 2. 유압 굴삭기 모델

유압 굴삭기 운동은 주행, 선회, 굴삭 및 크레인 등으로

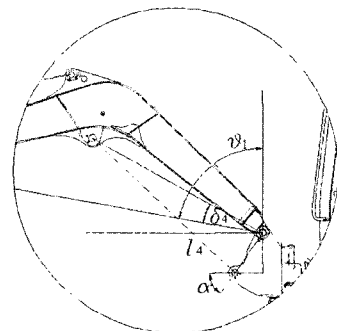
구분된다. 주행과 선회 운동은 유압모터에 의하여 발생되고 붐, 암, 버킷으로 구성된 작업장치에 의한 굴삭 및 크레인 운동은 3개의 핀로드 실린더를 독립적으로 조작하여 발생시킨다. 유압 굴삭기의 크레인 작업시 전도 안정성 해석에서 상부체의 선회와 주행을 포함하는 3차원 운동에서의 해석을 최종 목표로 설정하고 본 연구는 선행연구로서 유압 굴삭기의 작업장치의 운동을 모델링하는데 있어 주행과 선회를 고려하지 않는 2차원 크레인 운동으로 한정한다.

### 2.1 유압 굴삭기 작업장치의 위치 궤적

유압 굴삭기 작업장치의 운동을 표현하기 위해 Fig. 1과 같은 좌표계를 설정한다. 좌표계 {0}은 유압 굴삭기 차체의 중심에 고정되어진 기준 좌표계이다. 좌표계 {1}은 붐 연결부  $O_1$ 에 고정되어 있으며, 암 연결부  $O_2$ 와 버킷 연결부  $O_3$ 에 부착된 좌표계 {2}와 {3}은 각 연결부를 잇는 연장선을 기준으로 설정되어 있다.



(a) Schematic diagram



(b) Detailed diagram

Fig. 1 Coordinate system of hydraulic excavator

기준 좌표계를 원점으로 하여 붐, 암, 버켓의 끝단 위치 궤적을 나타내면 식 (1)~(3)과 같다.

$$\begin{aligned} x_1 &= X_{axis} + L_1 \sin(\theta_1) \\ y_1 &= Y_{axis} + L_1 \cos(\theta_1) \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} x_2 &= x_1 + L_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) \\ y_2 &= y_1 + L_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} x_3 &= x_2 + L_3 \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) \\ y_3 &= y_2 + L_3 \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) \end{aligned} \quad (3)$$

여기서  $X_{axis}$ ,  $Y_{axis}$ 는 좌표계 {0}과 {1}의 평행 이동을 나타내며,  $\theta_i$ 는 각 작업장치의 각변위를 의미하며 수직 축  $y_i$ 를 기준으로 시계방향을 양의 부호로 설정한다.  $L_i$ 는 각 연결부 사이의 거리를 나타내며, 아래첨자  $i = 1, 2, 3$ 은 각각 붐, 암, 버켓을 의미한다.

### 2.2 유압 굴삭기 무게중심 궤적

기준좌표계 원점을 기준으로 하여 각 장치의 무게중심 궤적을 도출한다. 이때 각 장치의 무게중심 궤적은 작업장치의 각변위 함수로 표현된다.

유압 굴삭기는 고정된 위치에서 작업장치를 동작시켜 크레인 작업을 수행하므로 차체의 무게중심은 고정이다. 작업장치인 붐, 암, 버켓의 무게중심 궤적은 식 (4)~(6)과 같다.

$$\begin{aligned} x_{1g} &= X_{axis} + l_1 \sin(\theta_1 - \delta_1) \\ y_{1g} &= Y_{axis} + l_1 \cos(\theta_1 - \delta_1) \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} x_{2g} &= x_1 + l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2 - \delta_2) \\ y_{2g} &= y_1 + l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2 - \delta_2) \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} x_{3g} &= x_2 + l_3 \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 - \delta_3) \\ y_{3g} &= y_2 + l_3 \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 - \delta_3) \end{aligned} \quad (6)$$

여기서  $l_i$ 은 각 좌표계 원점에서 작업장치 무게중심까지의 거리를 나타내며,  $\delta_i$ 은 각 작업장치에서 무게중심까지의 각도 상수를 나타낸다.

붐의 구동 실린더가 하단의 연결부를 중심으로 회전직선운동을 하면 붐은 붐 연결부를 중심으로 회전운동을 하게 된다. 붐의 구동 실린더의 무게중심 궤적은 하단 연결부를 중심으로 붐의 각변위 함수로 표현된다. 또한 암과 버켓의 구동 실린더의 회전각도 범위는 약 8~9[deg.]로 작은 값으로 구동 실린더의 무게중심은 각각 붐과 암에 고정되어 있

는 것으로 가정한다. 따라서 붐, 암, 버켓의 구동 실린더에 대한 무게중심 궤적은 식 (7)~(9)와 같다.

$$\begin{aligned} x_{4g} &= X_{axis} + l_4 \sin(\theta_1 - \delta_4 - \alpha) \\ y_{4g} &= Y_{axis} + l_4 \cos(\theta_1 - \delta_4 - \alpha) \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} x_{5g} &= X_{axis} + l_5 \sin(\theta_1 - \delta_5) \\ y_{5g} &= Y_{axis} + l_5 \cos(\theta_1 - \delta_5) \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} x_{6g} &= x_1 + l_6 \sin(\theta_1 + \theta_2 - \delta_6) \\ y_{6g} &= y_1 + l_6 \cos(\theta_1 + \theta_2 - \delta_6) \end{aligned} \quad (9)$$

여기서  $l_{4,5,6}$ ,  $\delta_{4,5,6}$ ,  $\alpha$ 는 작업장치의 기하학적인 형상에 의한 거리 및 각도 상수를 의미한다.

유압 굴삭기의 크레인 작업에서 버켓은 최대로 굽힌 상태를 유지하므로 버켓의 기구부에 설치된 버켓 링크와 컨트를 로드의 무게중심은 암 상단에 고정되어 진다. 따라서 버켓 링크와 컨트를 로드의 무게중심 궤적은 식 (10)~(11)로 표현된다.

$$\begin{aligned} x_{7g} &= x_1 + l_7 \sin(\theta_1 + \theta_2 - \delta_7) \\ y_{7g} &= y_1 + l_7 \cos(\theta_1 + \theta_2 - \delta_7) \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} x_{8g} &= x_1 + l_8 \sin(\theta_1 + \theta_2 - \delta_8) \\ y_{8g} &= y_1 + l_8 \cos(\theta_1 + \theta_2 - \delta_8) \end{aligned} \quad (11)$$

또한, 크레인 작업시 하중은 집중하중으로 암의 끝단에 설치되는 것으로 가정하면, 식 (12)와 같이 하중의 무게중심 궤적은 암 끝단의 궤적과 동일하다.

$$\begin{aligned} x_{mg} &= x_2 \\ y_{mg} &= y_2 \end{aligned} \quad (12)$$

### 2.3 기준 각변위 궤적 도출

자동 크레인 작업을 위해 작업장치에 대한 기준 각변위가 필요하다. 암 끝단의 궤적을 예측하여 기구학적인 관계에 의하여 기준 각변위를 도출하도록 한다.

붐의 연결구  $O_1$ 을 좌표 원점으로 하여 암 끝단의 위치 좌표  $(x_2, y_2)$ 를 나타내면 식 (13)과 같다.

$$\begin{aligned} x_2 &= L_1 \sin \theta_1 + L_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) \\ y_2 &= L_1 \cos \theta_1 + L_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \end{aligned} \quad (13)$$

유압 굴삭기의 암 끝단의 변위를 나타내면 식 (14)와 같다<sup>(11)</sup>.

$$p_a = \frac{L_0}{t_0} \left[ t - \frac{t_0}{2\pi} \sin \left( \frac{2\pi t}{t_0} \right) \right] \quad (14)$$

여기서  $L_0$ 는 암 끝단의 직선 이동 변위,  $t_0$ 는 작업시간을 나타낸다.

식 (14)를 사용하여 암 끝단의 기준궤적을 나타내면 식 (15)와 같다.

$$\begin{aligned} \tilde{x} &= L_1 \sin \theta_1^0 + L_2 \sin (\theta_1^0 + \theta_2^0) + p_a \cos (\theta_g) \\ \tilde{y} &= L_1 \cos \theta_1^0 + L_2 \cos (\theta_1^0 + \theta_2^0) + p_a \cos (\theta_g) \end{aligned} \quad (15)$$

여기서  $\theta_1^0, \theta_2^0$ 는 볼과 암의 초기 각변위를 나타내며,  $\theta_g$ 는 지면의 경사각을 나타낸다.

식 (13)과 (15)를 사용하여 자동 크레인 작업을 위한 기준 각변위 궤적을 구하면 식 (16)과 같다<sup>(11)</sup>.

$$\begin{aligned} \theta_1 &= \sin^{-1} \left[ \left( \tilde{x}^2 + \tilde{y}^2 + L_1^2 - L_2^2 \right) / 2L_1 \sqrt{\tilde{x}^2 + \tilde{y}^2} \right] \\ &\quad - \tan^{-1} (\tilde{y} / \tilde{x}) \\ \theta_2 &= \cos^{-1} \left[ \left( \tilde{x}^2 + \tilde{y}^2 - L_1^2 - L_2^2 \right) / 2L_1 L_2 \right] \end{aligned} \quad (16)$$

### 3. 전도 안정성 이론

#### 3.1 ZMP 이론

ZMP(Zero Moment Point)는 대상 시스템의 하부체 바다의 기준 좌표계에 대하여 시스템의 관성력, 중력, 외력 등에 의한 모멘트의 합이 영인 평면상의 점이라 정의한다<sup>(12,13)</sup>.

Fig. 2는 기준 좌표계 O-XYZ에서 질점에 대한 벡터의 관계를 나타내고 있다. 임의의 점 P에 대하여 D'Alembert 법칙을 적용하여 운동방정식을 유도하면 식 (17)과 같다.

$$\begin{aligned} \sum_i (r_i - p) \times m_i (\ddot{r}_i + g - \dot{p}) + \rho_c \times m \dot{p} \\ + \sum_i T_i - \sum_j M_j - \sum_k (s_k - p) \times f_k = M_p \end{aligned} \quad (17)$$

여기서  $m_i$ 는 질점의 질량,  $r_i = [x_i, y_i, z_i]^T$ 는 기준 좌표계 원점에 대한 질량 중심의 위치벡터,  $p = [x_p, y_p, 0]^T$ 는 임의의 점 P에 대한 X-Y 평면의 위치벡터,  $g = [0, 0, g_z]^T$ 는 중력가속도,  $T_i$ 는 회전관성모멘트,  $M_j$ 는 외부

에서 작용하는 모멘트,  $f_k$ 는 외력,  $s_k$ 는 외력이 작용하는 위치벡터 등을 각각 나타낸다. 임의의 점 P에 대한 질량 중심의 위치벡터  $\rho_c$ 는 식(18)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\rho_c = \frac{1}{m} \sum_i m_i (r_i - p) \quad (18)$$

여기서  $m$ 은 각 질점의 질량의 합을 나타낸다.

식(18)을 식(17)에 대입하여 정리하면 식(19)와 같다.

$$\begin{aligned} \sum_i (r_i - p) \times m_i (\ddot{r}_i + g) + \sum_i T_i \\ - \sum_j M_j - \sum_k (s_k - p) \times f_k = M_p \end{aligned} \quad (19)$$

임의의 점 P가 ZMP라고 하면 위치벡터  $p = p_{zmp} = [x_{zmp}, y_{zmp}, 0]^T$ 이고, 모멘트의 합은  $M_p = [0, 0, M_z]^T$ 이다. 따라서 ZMP에 대한 성분을 정리하면 식 (20)과 같다.

$$\begin{aligned} x_{zmp} &= \frac{\sum_i m_i (\ddot{z}_i + g_z) x_i - \sum_i m_i (\ddot{x}_i + g_x) z_i - \sum_j T_{yj} + \sum_j M_{yj} + \sum_j (s_{zj} f_{xj} - s_{xj} f_{zj})}{\sum_i m_i (\ddot{z}_i + g_z) - \sum_j f_{zj}} \\ y_{zmp} &= \frac{\sum_i m_i (\ddot{z}_i + g_z) y_i - \sum_i m_i (\ddot{y}_i + g_y) z_i + \sum_j T_{xj} + \sum_j M_{xj} + \sum_j (s_{yj} f_{zj} - s_{zj} f_{yj})}{\sum_i m_i (\ddot{z}_i + g_z) - \sum_j f_{zj}} \end{aligned} \quad (20)$$

외부에서 모멘트와 힘이 작용하지 않는다고 가정하면 ZMP에 대한 성분은 식(21)과 같다<sup>(12,13)</sup>.

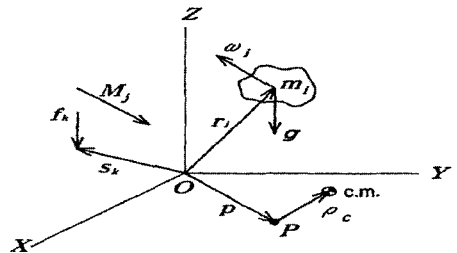


Fig. 2 Definition of vectors for system

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

$$y_{zmp} = \frac{\sum_i m_i (\ddot{z}_i + g_z) y_i - \sum_i m_i \ddot{y}_i z_i}{\sum_i m_i (\ddot{z}_i + g_z)} \quad (21)$$

### 3.2 유압 굴삭기의 전도 안정성 해석

크레인 작업시 유압 굴삭기의 자중과 부하를 포함하는 역학 관계에 의하여 유압 굴삭기의 본체가 지면상에서 자세를 유지하고 있으면 안정 상태라 하고 본체가 지면에서 이탈하여 전도가 발생되면 불안정 상태라 한다.

모멘트 방정식을 적용하는 경우 지면에서 지지하고 있는 모서리를 기준으로 양의 모멘트 값이 생기면 회전운동에 의하여 불안정 상태가 되고 음의 모멘트 값이 생기면 안정 상태가 된다. 따라서 모멘트의 부호에 따라 안정과 불안정 상태를 판별하는 기준이 된다. ZMP 이론에서는 ZMP가 지면의 지지면 내부에 존재하면 안정 상태가 되고 외부에 존재하면 불안정 상태가 된다. 따라서 ZMP의 궤적을 통하여 안정과 불안정 상태를 판별할 수 있다.

## 4. 시뮬레이션 및 결과 고찰

본 연구에서는 유압 굴삭기의 자동 크레인 작업을 수행할 때 모멘트 방정식과 ZMP 이론을 적용하여 전도에 대한 안정성 해석을 시뮬레이션을 통하여 확인하고자 한다.

작업조건은 암 끝단에 임의의 부하를 매달고 수평 이동과 수직 이동을 수행한다. ZMP 이론을 적용하기 위한 안정영역은 유압굴삭기가 지지되고 있는 하부체 바닥면으로 설정하여 Fig. 1에 표시된 것과 같이 ±L[m] 내부로 한정한다.

유압 굴삭기는 선회운동은 고려하지 않은 2차원 평면 운동으로 제한하여 궤적 계획을 수립한다. 궤적 계획은 2.3절에 의하여 암 끝단의 기준 궤적을 연산하고 역기구학 해석을 통하여 붐과 암의 각변위를 구한다. 크레인 작업시 버켓은 사용하지 않으므로 최대한 굽힌 자세로 고정한다.

시뮬레이션을 위하여 본 연구에 사용한 유압 굴삭기의 기구학적 제원은 Table 1과 같다. 여기서  $m_{up}$ ,  $m_{lw}$ 는 유압굴삭기의 상부체와 하부체의 질량을 나타내며,  $m_i$ 는 각 작업장치의 질량,  $L_i$ 는 각 연결부 사이의 거리,  $l_i$ 는 각 연결부와 작업장치의 무게중심까지의 거리,  $\delta_i$ 는 각 연결부를 이은 선과 무게중심을 이은 선과의 사잇각을 각각 나타낸다. 여기서 아래첨자  $i = 1, 2, 3$ 는 각각 붐, 암, 버켓을 의미한다. 또한

Table 1 Parameters of hydraulic excavator used in computer simulation

Para.	Value	Para.	Value
$m_{up}$	2378 [kg]	$L_1$	2.90 [m]
$m_{lw}$	2274 [kg]	$L_2$	1.60 [m]
$m_1$	228 [kg]	$L_3$	0.85 [m]
$m_2$	112 [kg]	$l_1$	1.46 [m]
$m_3$	155 [kg]	$l_2$	0.45 [m]
$m_4$	53 [kg]	$l_3$	0.37 [m]
$m_5$	42 [kg]	$l_4$	0.69 [m]
$m_6$	31 [kg]	$l_5$	2.41 [m]
$m_7$	13 [kg]	$l_6$	0.82 [m]
$m_8$	17 [kg]	$l_7$	1.55 [m]
$X_{axis}$	0.84 [m]	$l_8$	1.75 [m]
$Y_{axis}$	1.20 [m]	$\delta_1$	18 [deg.]
$x_{up}$	-0.59 [m]	$\delta_2$	12 [deg.]
$y_{up}$	1.08 [m]	$\delta_3$	39 [deg.]
$z_{up}$	0.01 [m]	$\delta_4$	19 [deg.]
$x_{lw}$	0 [m]	$\delta_5$	16 [deg.]
$y_{lw}$	0.30 [m]	$\delta_6$	25 [deg.]
$z_{lw}$	0.11 [m]	$\delta_7$	2 [deg.]
$a$	54.7 [deg.]	$\delta_8$	1 [deg.]

$G_{up} = [x_{up}, y_{up}, z_{up}]^T$ 와  $G_{lw} = [x_{lw}, y_{lw}, z_{lw}]^T$ 는 상부체와 하부체에 대한 좌표계 {0}에서의 위치벡터를 각각 의미하고, 각도  $\alpha$ 는 붐 연결부에서 가하학적 형상에 따른 상수를 나타낸다.

Fig. 3~6은 수평 작업에 대한 결과들을 나타내고 있다.

Fig. 3은 크레인의 수평 작업 개략도를 나타내고 있다. 암의 끝단은 지면으로부터 1[m] 높이에서 안쪽에서 바깥쪽으로 약 2.5[m] 이동하는 것으로 한다. Fig. 4는 수평 작업을 자동화하기 위한 작업장치의 기준 각변위 궤적을 나타내고 있다. 붐과 암의 각변위는 암 끝단의 기준궤적에 의하여 도출되고 버켓은 최대한 굽힘 상태로 유지시킨다. 초기 시간과 최종 시간의 각속도와 각가속도는 각각 영이 된다.

Fig. 5에서는 일정한 부하(1000[kg])에 대하여 평균속력을 1.67, 0.9, 0.5[m/s]로 변화시키며 작업반경에 따른 모멘트 값과 ZMP의 x-성분 궤적을 나타내고 있다. Fig. 5(a)에 나타낸 것과 같이 작업시간 변화에 관계없이 모멘트 값의 궤적

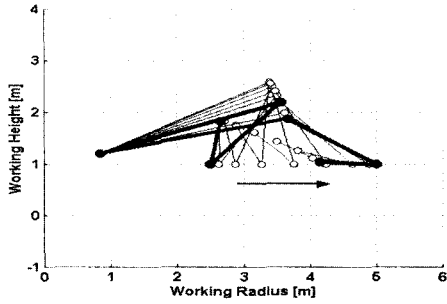


Fig. 3 The motion of attachment at horizontal work

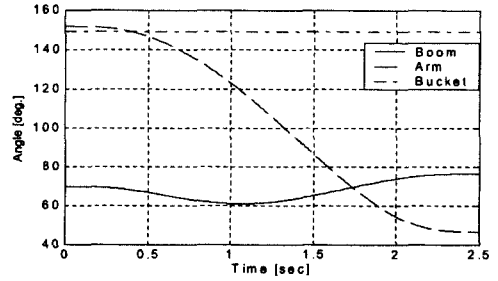
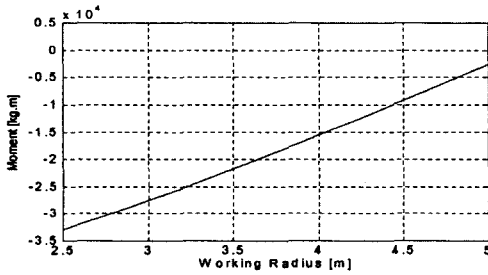
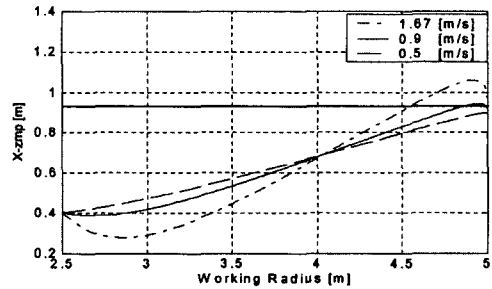


Fig. 4 Reference angles at horizontal work



(a) Moment trajectory



(b) ZMP trajectory

Fig. 5 Fixed load, varying work-time

은 동일하며 부호가 (-)이므로 유압 굴삭기는 항상 안정 상태를 나타낸다. 이것은 모멘트 방정식에서는 동적인 요소를 포함하고 있지 않기 때문이며 작업시간에 따른 진도 안정성을 알 수가 없다. Fig. 5(b)에서는 ZMP의 x-성분의 궤적을 나타내고 있다. 굵은 실선은 안정영역의 경계치로서  $L=0.932[m]$ 를 의미합니다. 평균속력이  $0.9[m/s]$ 보다 작은 경우에는 ZMP의 x-성분이 안정영역 내부에 존재하여 유압 굴삭기는 안정상태가 된다. 이것은 동적 요소의 영향이 작음을 알 수 있다. 그러나 평균속력이  $0.9[m/s]$ 보다 크게 되면 작업장치의 감속시간에서 발생하는 관성력으로 인하여 ZMP의 x-성분이 안정영역을 벗어나 유압 굴삭기는 불안정 상태가 된다. 따라서 수평 크레인 작업시 부하가  $1000[kg]$ 일 때는 평균속력을 약  $0.9[m/s]$  이하로 설정해야 유압 굴삭기의 진도가 발생하는 않는 안정 상태가 유지된다.

Fig. 6은 평균속력을  $1[m/s]$ 로 설정하고 부하의 변동을  $850, 980, 1100[kg]$ 으로 하였을 때 작업반경에 따른 모멘트 값과 ZMP의 x-성분 궤적을 나타내고 있다. Fig. 6(b)에서 굵은 실선은 안정영역의 경계치로서  $L=0.932[m]$ 를 의

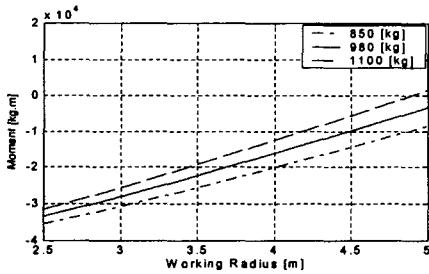
미합니다. Fig. 6(a)에서 알 수 있는 바와 같이 부하가  $1100[kg]$  이하에서는 모멘트 값의 부호가 (-)이므로 안정 상태를 나타낸다. 그러나 부하가  $1100[kg]$ 이 되면 작업반경이 약  $4.9[m]$ 에서 모멘트 값의 부호가 (+)가 되어 불안정 상태가 된다. Fig. 6(b)의 ZMP x-성분 궤적에서는 부하가  $980[kg]$  이하가 되면 안정 상태이나 부하가  $1100[kg]$ 일 때는 작업반경이  $4.6[m]$ 에서 안정영역을 벗어나게 된다. 따라서 수평 크레인 작업시 평균속력이  $1[m/s]$ 일 때는 부하를  $980[kg]$  이하로 선정해야 한다.

Fig. 7~10은 수직 작업에 대한 결과들을 나타내고 있다. Fig. 7은 크레인의 수직 작업 개략도를 나타내고 있다. 암의 끝단이 작업반경  $4[m]$ 에서 위에서 아래쪽으로 약  $5.5[m]$  이동하는 것으로 한다. Fig. 8은 수직 작업에 대한 작업장치의 기준 각변위 궤적을 나타내고 있다. 불과 암의 각변위는 암 끝단의 기준궤적에 의하여 도출되고 버킷의 각변위는 최대값으로 유지시킨다. 초기 시간과 최종 시간의 각속도와 각 가속도는 각각 영이 된다.

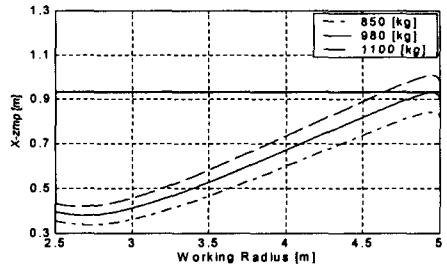
Fig. 9는 일정한 부하( $1400[kg]$ )에 대하여 평균속력을

1.1, 0.55, 0.275[m/s]로 변화시키며 작업높이에 따른 모멘트 값과 ZMP의 x-성분 궤적을 나타내고 있다. Fig. 9(b)에서 굵은 실선은 안정영역의 경계치를 의미합니다. Fig. 9(a)에 나타난 것과 같이 작업시간 변화에 관계없이 모멘트 값의 궤적은 동일하며 부호가 (-)이므로 유압 굴삭기는 항상 안정상태임을 나타낸다. Fig. 9(b)에서는 평균 작업속력이 0.55

[m/s] 보다 작은 경우 ZMP의 x-성분이 안정영역 내부에 존재하여 유압 굴삭기가 안정상태가 되나 평균속력이 0.55 [m/s] 보다 큰 경우 작업장치의 감속시간대에서 발생하는 관성력으로 인하여 ZMP의 x-성분이 안정영역을 벗어나 유압 굴삭기는 불안정 상태가 된다. 수직 작업에서는 중력가속도의 영향으로 ZMP의 변화폭이 수평 작업시 보다 크게 나타



(a) Moment trajectory



(b) ZMP trajectory

Fig. 6 Fixed work-time, varying load

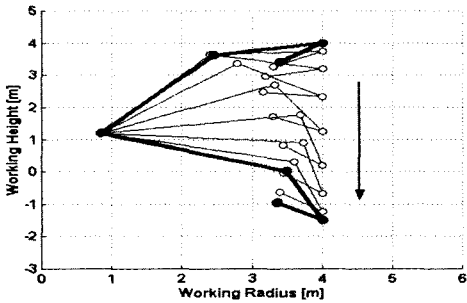


Fig. 7 The motion of attachment at vertical work

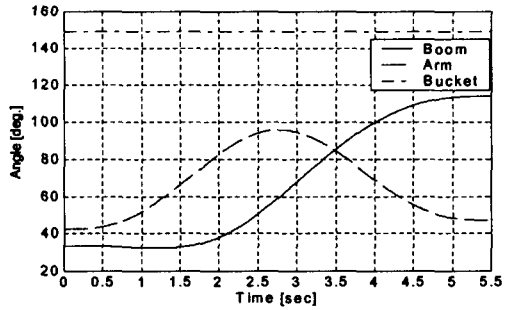
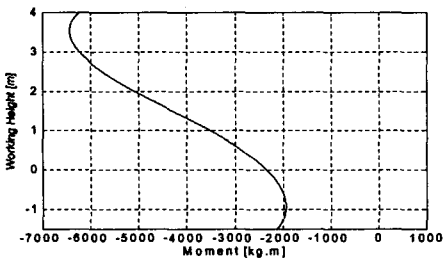
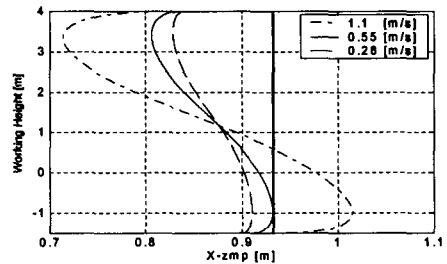


Fig. 8 Reference angles at vertical work

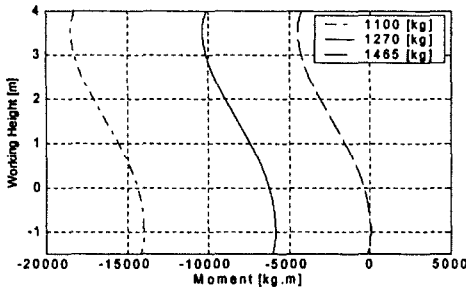


(a) Moment trajectory

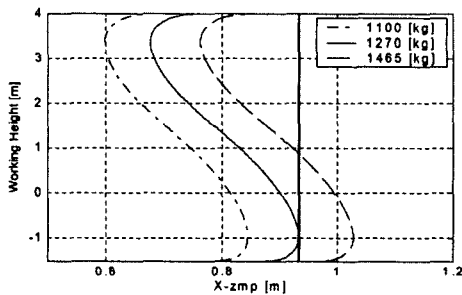


(b) ZMP trajectory

Fig. 9 Fixed load, varying work-time



(a) Moment trajectory



(b) ZMP trajectory

Fig. 10 Fixed work-time, varying load

난다. 따라서 수직 크레인 작업시 작업반경이 4[m]에서 부하가 1400[kg]일 때는 평균속력을 약 0.55 [m/s] 이하로 설정해야 유압 굴삭기의 전도가 발생되는 않는 안정 상태가 유지된다.

Fig. 10은 평균속력을 1[m/s]로 설정하고 부하의 변동을 1100, 1270, 1465[kg]으로 하였을 때 작업높이에 따른 모멘트 값과 ZMP의 x-성분 궤적을 나타내고 있다. Fig. 10(b)에서 굵은 실선은 안정영역의 경계치를 의미합니다. Fig. 10(a)에서 알 수 있는 바와 같이 부하가 1465[kg] 이하에서는 모멘트 값의 부호가 (-)이므로 안정 상태를 나타낸다. 그러나 부하가 1465[kg] 이상이 되면 모멘트 값의 부호가 (+)가 되는 지점이 발생되어 불안정 상태가 된다. Fig. 10(b)의 ZMP x-성분 궤적에서는 부하가 1270[kg] 이하가 되면 안정 상태이나 이상이 되면 작업장치의 감속시간대에서 관성력으로 인하여 안정영역을 벗어나 불안정 상태가 된다. 따라서 수직 크레인 작업시 작업반경 4[m]에서 평균속력이 1[m/s]일 때는 부하를 1270[kg] 이하로 선정해야 한다.

## 5. 결론

본 연구에서는 자동화 유압 굴삭기에서 크레인 작업을 수행할 때 ZMP 이론을 적용하여 전도에 대한 안정성 해석을 제안하였다. 자동 크레인 작업에서 수평 작업과 수직 작업으로 구분하여 시뮬레이션을 통하여 전도 안정성을 해석하였다. 크레인 작업시 전도를 발생시키는 요소에는 유압 굴삭기와 부하의 정적인 요소뿐만 아니라 부하 이동에 의한 동적인 요소도 포함된다. 전도 안정성을 해석하기 위한 기존의 모멘트 방정식은 정적인 상태에서 적용되므로 동적 요소가 전도 안정성에 미치는 영향은 해석되지 않는다. 그러나 ZMP 이론을 적용하면 정적인 요소뿐만 아니라 동적인 요소도 모두 고려할 수 있어 부하 이동의 평균속력이 증가할수록 정적인 상태에서의 부하보다 감소되어야 함을 시뮬레이션을 통하여 확인할 수 있었다.

향후 ZMP 이론을 적용하여 유압 굴삭기 작업장치의 평면작업뿐만 아니라 상부체의 선회 및 주행을 포함한 3차원 상에서 크레인 작업시 유압 굴삭기의 전도에 대해 해석하고자 한다.

## 후 기

본 연구는 과학기술부-한국과학재단 지정 울산대학교 기계부품 및 소재 특성평가연구소에 의해 지원되었습니다.

## 참 고 문 헌

- (1) Kimura, N., Araya, H., and Kakuzer, M., 1987, "Automatic Control System for Hydraulic Excavator," *Kobe Steel Engineering Report*, Vol. 37, No. 2.
- (2) Seo, W. S., Kim, S. S., Yang, S. Y., Lee, B. R., and Ahn, K. K., 2001, "A Study on Trajectory Tracking Control of Field Robot," *Proc. ICCAS*, pp. 2887~2890.
- (3) Choi, J. H., Kim, S. S., Yang, S. Y., and Lee, J. G., 2004, "Robust Control of Trajectory Tracking for Hydraulic Excavator," *Journal of Control, Automation, and Systems Engineering*, Vol. 10, No. 1, pp. 22~29.
- (4) Choi, J. H., Um, H., Lim, T. H., Kim, S. S., Yang,



- S. Y., Lee, B. R., and Ahn, K. K., 2003, "A Study on Stability of Excavator using ZMP," *Proc. of KSMTE Conference*, pp. 86~92.
- (5) Yamaguchi, J., Takanish, A., and Kato, I., 1993, "Development of A Biped Robot Compensating for Three-Axis Moment by Trunk Motion," *Proc. of the 1993 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 561~566.
- (6) Sorao, K., Murakami, T., and Ohnishi, K., 1997, "A Unified Approach to ZMP and Gravity center Control in Biped Dynamic Stable Walking," *IEEE/ASME International Conference on*, pp. 112~117.
- (7) Kajita, S., and Tani, K., 1991, "Study of Dynamic Biped Locomotion on Rugged Terrain," *Proc. of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 1405~1411.
- (8) Huang, Q., and Sugano, S., 1995, "Manipulator Motion Planning for Stabilizing a Mobile-Manipulator," *Proc. IEEE/RSJ International Conference*, pp. 467~472.
- (9) Vukobratovic, M., Frank, A. A., and Juricic, D., 1970, "On the stability of biped locomotion," *IEEE Trans. Bio-medical Engineering*, pp. 25~36.
- (10) Ghasempoor, A., and Sepehri, N., 1998, "A Measure of Stability for Mobile Manipulators with Application to Heavy-Duty Hydraulic Machines," *ASME*, Vol. 120, pp. 360~370.
- (11) Morita, T., and Sakawa, Y., 1986, "Modeling and Control of a Power Shovel," *Japan Society of Measurement and Automatic Control*, Vol. 22, No. 1, pp. 69~75.
- (12) Sugano, S., Huang, Q., and Kato, I., 1993, "Stability Criteria in Controlling Mobile Robotic Systems," *Proc. of the 1993 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 832~838.
- (13) Kim, J. H., Chung, W. K., Youm, Y. G. and Lee, B. H., 2002, "Real-time ZMP Compensation Method using Null Motion for Mobile Manipulators," *Proc. of the 2002 IEEE International Conference on Robotics & Automation*, pp. 1967~1972.