

## Field Robot 의 모델링과 구축에 관한 연구

임태형\*(울산대 기계자동차 대학원), 양순용(울산대 기계자동차공학부),  
이병룡(울산대 기계자동차공학부), 안경관(울산대 기계자동차공학부), 김승수(울산대 RRC)

A study on modeling and construction of Field Robot

T.H.Lim(school of Mechanical & automotive, UOU), S.Y.Yang(school of Mechanical & automotive, UOU),  
B.R.Lee(school of Mechanical & automotive, UOU), K.K.Ahn(school of Mechanical & automotive, UOU),  
S.S.Kim(RRC, UOU)

### ABSTRACT

Automation of Field Robot has many advantages for efficiency and convenience. In this paper, mathematical equation of field robot is established and automation system is constructed. Hydraulic and Dynamic equation of field robot are constructed in this paper. Inputs of system are angle data from each link (boom, arm, bucket, swing) and pressure data from in, out port of each cylinder. Outputs of system are voltage into electro-proportional valve.

**Key Words** : Filed Robot (필드로봇), excavator (굴삭기), Boom (붐), Arm (암), Bucket (버킷), Swing (스윙), EPPR V/V (비례제어밸브), Hydraulic equation (유압방정식), Lagrange equation (라그랑지방정식)

### 1. 서론

건설현장에서의 굴삭작업은 전문적인 조작을 필요로 하면서 노동집약적인 성격을 가진다. 동시에 열악한 환경에서의 작업이 많으므로 날이 갈수록 숙련자가 줄어들고 있는 실정이지만 건설시장의 규모는 2000년을 기준으로 700억불에 달하고 있다.

이를 효과적으로 해결할 수 있는 방안 중 하나가 건설기계의 자동화이다. 본 논문은 건설기계 중 유압굴삭기의 자동굴삭, 지능굴삭을 위한 선행연구로서 지능형 자동굴삭기의 최종목표는 비전카메라의 장착으로 원격굴삭과 자동굴삭이 가능한 필드로봇으로의 구축이라고 할 수 있겠다.

본 논문에서는 이들 지능형 자동굴삭의 근간이 되는 유압굴삭기에서의 버킷 끝단의 경로를 설정하고 버킷끝단의 위치추종을 만족시키기 위해 유압실린더와 선회 모터의 위치를 제어하는 것을 목표로 한다.

선회모터와 붐, 암, 버킷 실린더의 위치제어를 동시에 수행함으로써 정지된 3 차원 상에서의 버킷 위치를 제어할 수 있게 되는 것을 나타내었다.

굴삭기의 상세한 제원은 위 내용을 실험장치로 만들고 있는 국내의 모 굴삭기 모델의 실제 물성치를 사용하여 실험치와의 비교를 용이하게 하였다.

제작중인 자동굴삭 시스템의 결과치와의 비교값은 추후 연구에서 다루기로 한다.

### 2. 모델링

#### 2.1 작업장치의 운동방정식

본 논문에서는 정지상태의 굴삭기의 작업을 고려하므로 액츄에이터를 선회모터, 붐실린더, 암실린더, 버킷실린더로 제한하여 생각한다.

각 액츄에이터는 그림 1.에서처럼 각  $\theta_0, \theta_1, \theta_2, \theta_3$  를 결정한다. 상부선회체, 붐, 암, 버킷은 강체라고 가정하고 각 관절에서의 마찰은 무시하기로 가정한다.

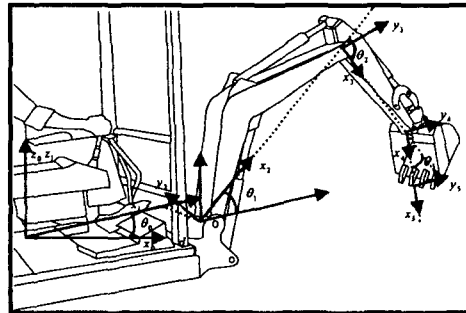


Fig. 1 coordinates in each attachment

Lagrange equation 을 이용하여 운동방정식을 유도해 낸다.

$$[J(\theta)]\ddot{\theta} + [H(\theta, \dot{\theta})] + [G(\theta)] = [\tau_n] \quad (1)$$

여기서  $J(\theta)$  는 관성행렬이고  $\theta \in R^n$  일 때 매칭, 양의 한정이다.  $H(\theta, \dot{\theta})$  는 Coriolis 힘과 원심

력에 의한 힘,  $G(\theta)$  는 중력항,  $\tau_n$  는 각 실린더와 모터에 의한 토크이다.

위 식을 Christoffel 기호를 이용한 식으로 변환하면 아래와 같다.

$$\sum_j J_{ij}(\theta)\ddot{\theta}_j + \sum_{i,j} C_{ijn}(\theta)\dot{\theta}_i\dot{\theta}_j - \frac{\partial U}{\partial \theta_n} = \tau_n \quad (2)$$

$$T = \frac{1}{2} \dot{\theta}^T J(\theta) \dot{\theta} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_0 & \dot{\theta}_1 & \dot{\theta}_2 & \dot{\theta}_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} J_{11} & J_{12} & J_{13} & J_{14} \\ J_{21} & J_{22} & J_{23} & J_{24} \\ J_{31} & J_{32} & J_{33} & J_{34} \\ J_{41} & J_{42} & J_{43} & J_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_0 \\ \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \\ \dot{\theta}_3 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$J_{11} = m_{bm} \{d^2 + (L_0 + l_1 C_{1\delta_1})^2\} + m_{am} \{d^2 + (L_0 + L_1 C_1 + l_2 C_{12\delta_1})^2\} + m_{hk} \{d^2 + (L_0 + L_1 C_1 + L_2 C_{12} + l_3 C_{123\delta_1})^2\} + I_{zz}^{rw} + S_1^2 I_{xx}^{hm} + C_1^2 I_{yy}^{hm} + S_{12}^2 I_{xx}^{am} + C_{12}^2 I_{yy}^{am} + S_{123}^2 I_{xx}^{hk} + C_{123}^2 I_{yy}^{hk}$$

$$J_{12} = m_{bm} l_1^2 + m_{am} (L_1^2 C_1^2 + l_2^2 + 2L_1 L_2 C_1 C_2 + 2L_1 L_3 C_1 C_3 + 2L_2 L_3 C_2 C_3) + m_{hk} (L_1^2 C_1^2 + L_2^2 + l_3^2 + 2L_1 L_2 C_1 C_2 + 2L_1 L_3 C_1 C_3 + 2L_2 L_3 C_2 C_3) + I_{zz}^{am} + I_{zz}^{hk}$$

$$J_{33} = m_{am} l_2^2 + m_{hk} (L_2^2 + l_3^2 + 2L_2 L_3 C_2 C_3) + I_{zz}^{am} + I_{zz}^{hk}$$

$$J_{44} = m_{hk} l_3^2 + I_{zz}^{hk}$$

$$J_{12} = J_{21} = -2m_{bm} d l_1 S_{1\delta_1} - 2m_{am} d (L_1 C_1 S_1 + l_2 S_{12\delta_1}) - 2m_{hk} d (L_1 C_1 S_1 + L_2 S_{12} + 2l_3 S_{123\delta_1})$$

$$J_{13} = J_{31} = -2m_{am} d l_2 S_{12\delta_1} - 2m_{hk} d (L_2 S_{12} + l_3 S_{123\delta_1})$$

$$J_{14} = J_{41} = -2m_{hk} d l_3 S_{123\delta_1}$$

$$J_{23} = J_{32} = 2m_{am} l_2 (L_1 C_1 C_2 + l_2) + 2m_{hk} (L_1 L_2 C_1 C_2 + l_3 L_2 C_{23\delta_1} + 2l_3 C_{3\delta_1} + l_3^2) + 2I_{zz}^{am} + 2I_{zz}^{hk}$$

$$J_{24} = J_{42} = 2m_{hk} l_3 (L_1 C_1 C_{23\delta_1} + L_2 C_{3\delta_1} + l_3) + 2I_{zz}^{hk}$$

$$J_{34} = J_{43} = 2m_{hk} l_3 (L_2 C_{3\delta_1} + l_3) + 2I_{zz}^{hk}$$

위치 에너지를 구하면 다음과 같다.

$$U = g[m_{bm} l_1 S_{1\delta_1} + m_{am} (L_1 S_1 + l_2 S_{12\delta_1}) + m_{hk} (L_1 S_1 + L_2 S_{12} + l_3 S_{123\delta_1})] \quad (4)$$

$C_{ijn}$  를 (제 1 종의) Christoffel 기호라 하고 고정된  $n$  에 대해  $C_{ijn} = C_{jin}$  인 성질이 있다.

$$c_{112} = \frac{1}{2} \left[ \frac{\partial J_{21}}{\partial \theta_0} + \frac{\partial J_{11}}{\partial \theta_1} - \frac{\partial J_{11}}{\partial \theta_2} \right] = -\frac{\partial J_{11}}{\partial \theta_2} \quad (5)$$

$$h_1 = \frac{1}{2} \left[ \frac{\partial J_{11}}{\partial \theta_1} \dot{\theta}_1 + \frac{\partial J_{12}}{\partial \theta_1} \dot{\theta}_2 + \frac{\partial J_{13}}{\partial \theta_1} \dot{\theta}_3 + \frac{\partial J_{14}}{\partial \theta_1} \dot{\theta}_4 + \frac{\partial J_{11}}{\partial \theta_2} \dot{\theta}_0 \dot{\theta}_1 + \frac{\partial J_{12}}{\partial \theta_2} \dot{\theta}_0 \dot{\theta}_2 + \frac{\partial J_{13}}{\partial \theta_2} \dot{\theta}_0 \dot{\theta}_3 + \frac{\partial J_{14}}{\partial \theta_2} \dot{\theta}_0 \dot{\theta}_4 + \frac{\partial J_{11}}{\partial \theta_3} \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 + \frac{\partial J_{12}}{\partial \theta_3} \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_3 + \frac{\partial J_{13}}{\partial \theta_3} \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_4 + \frac{\partial J_{11}}{\partial \theta_4} \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_3 + \frac{\partial J_{12}}{\partial \theta_4} \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_4 + \frac{\partial J_{13}}{\partial \theta_4} \dot{\theta}_2 \dot{\theta}_3 + \frac{\partial J_{14}}{\partial \theta_4} \dot{\theta}_2 \dot{\theta}_4 \right]$$

$$h_2 = -\frac{1}{2} \left[ \frac{\partial J_{11}}{\partial \theta_1} \dot{\theta}_1^2 + \frac{\partial J_{12}}{\partial \theta_1} \dot{\theta}_2^2 + \frac{\partial J_{13}}{\partial \theta_1} \dot{\theta}_3^2 + \frac{\partial J_{14}}{\partial \theta_1} \dot{\theta}_4^2 + \frac{\partial J_{11}}{\partial \theta_2} \dot{\theta}_0 \dot{\theta}_1 + \frac{\partial J_{12}}{\partial \theta_2} \dot{\theta}_0 \dot{\theta}_2 + \frac{\partial J_{13}}{\partial \theta_2} \dot{\theta}_0 \dot{\theta}_3 + \frac{\partial J_{14}}{\partial \theta_2} \dot{\theta}_0 \dot{\theta}_4 + \frac{\partial J_{11}}{\partial \theta_3} \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 + \frac{\partial J_{12}}{\partial \theta_3} \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_3 + \frac{\partial J_{13}}{\partial \theta_3} \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_4 + \frac{\partial J_{11}}{\partial \theta_4} \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_3 + \frac{\partial J_{12}}{\partial \theta_4} \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_4 + \frac{\partial J_{13}}{\partial \theta_4} \dot{\theta}_2 \dot{\theta}_3 + \frac{\partial J_{14}}{\partial \theta_4} \dot{\theta}_2 \dot{\theta}_4 \right]$$

$$h_3 = -\frac{1}{2} \left[ \frac{\partial J_{11}}{\partial \theta_1} \dot{\theta}_1^2 - 2 \frac{\partial J_{12}}{\partial \theta_1} \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 + \frac{\partial J_{13}}{\partial \theta_1} \dot{\theta}_1^2 + \frac{\partial J_{11}}{\partial \theta_2} \dot{\theta}_0 \dot{\theta}_1 + \frac{\partial J_{12}}{\partial \theta_2} \dot{\theta}_0 \dot{\theta}_2 + \frac{\partial J_{13}}{\partial \theta_2} \dot{\theta}_0 \dot{\theta}_3 + \frac{\partial J_{14}}{\partial \theta_2} \dot{\theta}_0 \dot{\theta}_4 + \frac{\partial J_{11}}{\partial \theta_3} \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 + \frac{\partial J_{12}}{\partial \theta_3} \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_3 + \frac{\partial J_{13}}{\partial \theta_3} \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_4 + \frac{\partial J_{11}}{\partial \theta_4} \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_3 + \frac{\partial J_{12}}{\partial \theta_4} \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_4 + \frac{\partial J_{13}}{\partial \theta_4} \dot{\theta}_2 \dot{\theta}_3 + \frac{\partial J_{14}}{\partial \theta_4} \dot{\theta}_2 \dot{\theta}_4 \right]$$

$$h_4 = -\frac{1}{2} \left[ \frac{\partial J_{11}}{\partial \theta_1} \dot{\theta}_1^2 - 2 \frac{\partial J_{12}}{\partial \theta_1} \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 + \frac{\partial J_{13}}{\partial \theta_1} \dot{\theta}_1^2 + \frac{\partial J_{11}}{\partial \theta_2} \dot{\theta}_0 \dot{\theta}_1 + \frac{\partial J_{12}}{\partial \theta_2} \dot{\theta}_0 \dot{\theta}_2 + \frac{\partial J_{13}}{\partial \theta_2} \dot{\theta}_0 \dot{\theta}_3 + \frac{\partial J_{14}}{\partial \theta_2} \dot{\theta}_0 \dot{\theta}_4 + \frac{\partial J_{11}}{\partial \theta_3} \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 + \frac{\partial J_{12}}{\partial \theta_3} \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_3 + \frac{\partial J_{13}}{\partial \theta_3} \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_4 + \frac{\partial J_{11}}{\partial \theta_4} \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_3 + \frac{\partial J_{12}}{\partial \theta_4} \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_4 + \frac{\partial J_{13}}{\partial \theta_4} \dot{\theta}_2 \dot{\theta}_3 + \frac{\partial J_{14}}{\partial \theta_4} \dot{\theta}_2 \dot{\theta}_4 \right]$$

$$g_1 = 0$$

$$g_2 = g[m_{bm} l_1 C_{1\delta_1} + m_{am} (L_1 C_1 + l_2 C_{12-\delta_1}) + m_{hk} (L_1 C_1 + L_2 C_{12} + l_3 C_{123-\delta_1})]$$

$$g_3 = g[m_{am} l_2 C_{12-\delta_1} + m_{hk} (L_2 C_{12} + l_3 C_{123-\delta_1})]$$

$$g_4 = g m_{hk} l_3 C_{123-\delta_1}$$

## 2.2 유압회로

본 논문에서 이용된 모델의 유압펌프는 고정형 펌

프이므로 공급압이 일정하고 cavitation 은 없다고 가정한다.

전체 유압회로는 아래와 같다.

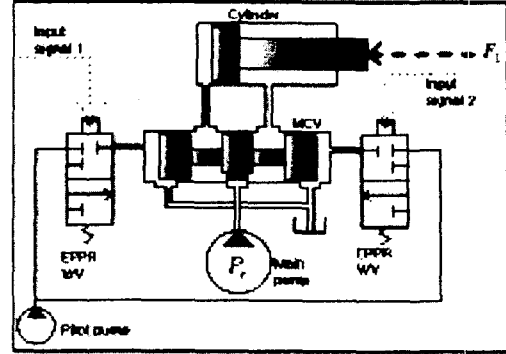


Fig. 2 Hydraulic circuit

Fig. 2 는 붐,압,버킷에 각각 적용되는 유압회로 중 하나를 나타내었다. Main pump 에서 발생된 유압이 Main Control Valve(MCV)를 통해 실린더로 흘러 들어가 유압을 발생시키고 이 유압이 각 작업장치를 움직이게 된다. 이 때 MCV 스톱을 좌우로 움직이는 pilot 압력은 보통의 유압굴삭기의 경우 운전석의 joystick 의 조작으로 제어되나 자동굴삭 시스템의 경우 비례제어 밸브로 제어된다.

### 2.2.1 비례제어 밸브

비례제어 밸브는 입력으로 전류를 받아서 pilot 압력을 내보내게 되는데 사용된 밸브의 특성은 아래와 같다.

$$P_p = 0.132i - 29.4 \quad (250 \leq i \leq 450[mA]) \quad (6)$$

### 2.2.2 MCV

MCV 에서 pilot 압력과 스톱변위 사이의 관계는 아래와 같고 이는 붐,압,버킷,스윙 모두 동일하다.

$$x_v = 7.8438e - 9P_p - 0.0028 \quad (353039.4 \leq P_p \leq 480525.85[N/m^2]) \quad (7.a)$$

$$x_v = 3.8924e - 9P_p - 8.702e - 4 \quad (480525.85 \leq P_p \leq 1765197) \quad (7.b)$$

스톱변위와 개구면적 관계를 나타내는 개구선도는 붐,압,버킷,스윙이 모두 다르지만 아래에 대표적으로 붐의 up,down 에 대한 개구선도를 나타내었다. 실제의 개구선도를 넣음으로 하여 모델링의 정확도를 피할 수 있었다.

만약 cylinder 의 속도가 양이라면 MCV 에서 cylinder 로 들어가는 유량을  $Q_1$ , cylinder 에서 MCV 로 흘러나오는 유량을  $Q_2$  라 한다면 두 유량의 비를  $\eta$  라 정의하고 아래와 같이 나타낸다.

$$\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{C_d a_2 \sqrt{\frac{2P_2}{\rho}}}{C_d a_1 \sqrt{\frac{2(P_s - P_1)}{\rho}}} = \eta \quad (8)$$

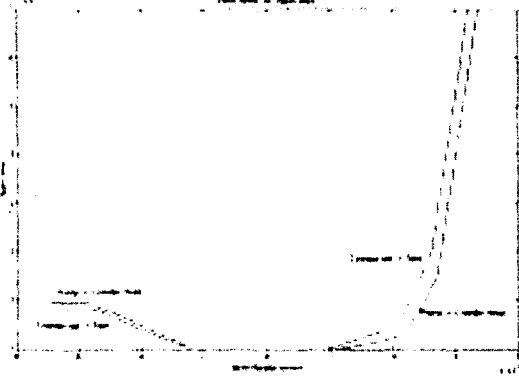


Fig. 3 Spool disp. Vs Open area

또, 부하유량을  $P_L = P_1 - P_2$ 라 하고 (8)식에 대입하면  $P_1$ 과  $P_2$ 를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$P_1 = \frac{\eta^2 P_s + P_L}{1 - \eta^2}, \quad P_2 = \frac{\eta^2 (P_s - P_L)}{1 + \eta^2} \quad (9)$$

이 때  $\eta = \frac{a_2 A_1}{a_1 A_2}$  이고  $a_1$ 은 들어가는 쪽의 개구면적,  $a_2$ 는 나오는 쪽의 개구면적,  $A_1$ 은 piston head 면적,  $A_2$ 는 piston rod 면적이다.

마찬가지로 cylinder 속도가 음일 때 압력을 아래와 같이 구할 수 있다.

$$P_1 = \frac{P_s + P_L}{1 + \eta^2}, \quad P_2 = \frac{P_s - P_L \eta^2}{1 + \eta^2} \quad (10)$$

### 2.2.3 Cylinder

MCV로부터 실린더로 유입, 유출된 유량의 평균 유량을 부하유량이라 하고 이에 대한 방정식을 구하면 아래와 같다.

$$Q_L = A_{mc} \dot{x}_p + \frac{V_c}{4\beta_e} \dot{P}_L \quad (11)$$

여기서  $Q_L = \frac{Q_1 + Q_2}{2}$  이고  $\beta_e$  = Bulk modulus 이다.

$$V_c = \frac{2V}{1 + \eta^2} \left\{ \eta^3 + \frac{V_1}{V} (1 - \eta^3) \right\}, \quad A_{mc} = \frac{(1 + \eta)(A_1 - A_2)}{2(1 - \eta)}$$

위 식을 정리하면 cylinder 속도에 관한 미분방정식이 나오는데 아래와 같다.

$$\dot{x}_p = \frac{1}{2\beta_e A_{mc}} (-A_1 \dot{P}_1 (1 - \eta^3) k_p - V \eta^3 \dot{P}_2 - V_{10} (1 - \eta^3) \dot{P}_2 + 2\beta_e Q_L) \quad (12)$$

또, cylinder의 운동방정식은 아래와 같다.

$$m \ddot{x}_p = A_2 P_L - F_L \quad (13)$$

### 3. Link Gain

각 cylinder의 변위, 속도가 관절에서의 각변위,

각속도가 아니고 힘이 관절에서의 토크가 아니므로 관절에서의 각변위, 각속도, 토크로 변환할 필요가 있다.

### 3.1 Boom link gain

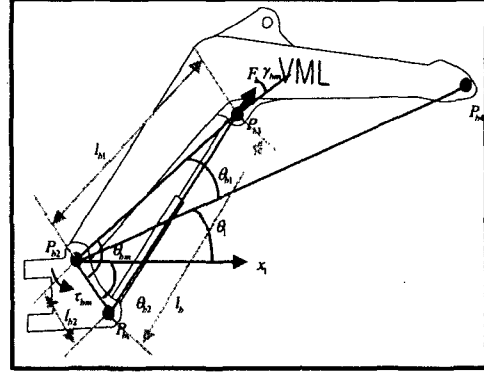


Fig. 4 Boom link gain

$\Delta(P_{b1}, P_{b2}, P_{b3})$ 에 cosine 제 2 법칙을 적용하면  $l_b = \sqrt{l_{b1}^2 + l_{b2}^2 - 2l_{b1}l_{b2} \cos \theta_{bm}}$  이므로 실린더의 변위 속도로부터 관절의 각변위, 각속도를 구할 수 있다.

$$\theta_1 = \theta_b - \theta_{b1} - \theta_{b2} = \cos^{-1} \left( \frac{l_{b1}^2 + l_{b2}^2 - l_b^2}{2l_{b1}l_{b2}} \right) - \theta_{b1} - \theta_{b2}$$

$$\dot{\theta}_1 = \frac{l_b \dot{l}_b}{l_{b1}l_{b2} \sin(\theta_{b1} + \theta_{b2} + \theta_1)} \quad (14)$$

$$\tau_{bm} = l_{b1} F_b \sin \gamma_{bm}$$

여기서  $\gamma_{bm} = \sin^{-1} \left( \frac{l_{b2}}{l_b} \sin \theta_{bm} \right) = \sin^{-1} \left( \frac{l_{b2}}{l_b} \sin(\theta_{b1} + \theta_{b2} + \theta_1) \right)$  이다.

### 3.2 Arm link gain

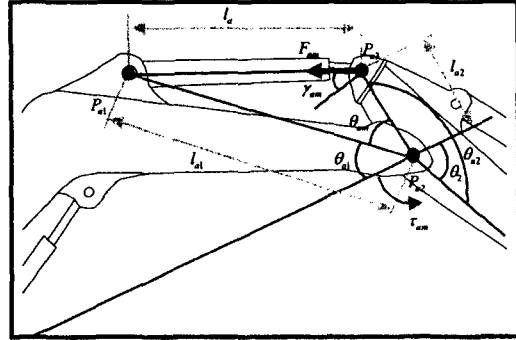


Fig. 4 Arm link gain

Arm 역시 Boom 과 마찬가지로 구할 수 있다.

$$l_a = \sqrt{l_{a1}^2 + l_{a2}^2 - 2l_{a1}l_{a2} \cos \theta_{am}}$$

$$\theta_2 = \theta_{am} + \theta_{a1} + \theta_{a2} - \pi = \cos^{-1} \left( \frac{l_{a1}^2 + l_{a2}^2 - l_a^2}{2l_{a1}l_{a2}} \right) + \theta_{a1} + \theta_{a2} - \pi$$

$$\dot{\theta}_2 = \frac{l_a \dot{l}_a}{l_{a1}l_{a2} \sin(\pi + \theta_2 - \theta_{a1} - \theta_{a2})} \quad (15)$$

$$\tau_a = l_{a2} F_a \sin \gamma_{am}$$

여기서  $\gamma_{am} = \cos^{-1} \left( \frac{l_a^2 + l_{a2}^2 - l_{a1}^2}{2l_a l_{a2}} \right) - \frac{\pi}{2}$  이다.

### 3.3 Bucket link gain

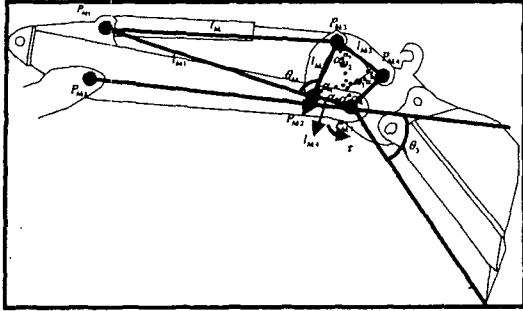


Fig. 5 Bucket link gain

$$l_{bk} = \sqrt{l_{bk1}^2 + l_{bk2}^2 - 2l_{bk1}l_{bk2} \cos \theta_{bk}} \quad (16)$$

$$\theta_{bk} = 2\pi - \theta_{bk1} - \delta_{bk2} \text{ 이므로 } \alpha_1 = \cos^{-1} \left( \frac{w_1^2 + l_{bk2}^2 - l_{bk3}^2}{2w_1 l_{bk2}} \right)$$

$$\alpha_2 = \cos^{-1} \left( \frac{w_1^2 + l_{bk4}^2 - l_{bk5}^2}{2w_1 l_{bk4}} \right), \theta_{bk1} = \alpha_1 + \alpha_2 \text{ 이다.}$$

$$\theta_{bk2} = \alpha_3 + \alpha_4 \quad \text{이므로}$$

$$\alpha_3 = \cos^{-1} \left( \frac{w_2^2 + l_{bk4}^2 - l_{bk5}^2}{2w_2 l_{bk4}} \right), \alpha_4 = \cos^{-1} \left( \frac{w_2^2 + l_{bk3}^2 - l_{bk5}^2}{2w_2 l_{bk3}} \right)$$

위의 과정으로 버킷의 4 절링크 내의 모든 각도와  $\theta_3$ 가 표현될 수 있다.

$P_{bk7}$ 에서  $\theta_{bk2} = \theta_3 + \pi - \delta_{bk1} - \delta_{bk3}$ 인데 이를 미분하면  $\dot{\theta}_{bk2} = \dot{\theta}_3$ 이므로  $\dot{\alpha}_3 + \dot{\alpha}_4 = \dot{\theta}_3$ 임을 알 수 있다.

$$\text{여기서 } \dot{\alpha}_3 = \frac{l_{bk2}}{\cos \alpha_3} \left\{ \frac{\cos \theta_{bk1}}{w_2} - \frac{l_{bk2} l_{bk4} \sin \theta_{bk1}}{w_2^2} \right\} \dot{\theta}_{bk1}, \quad (17)$$

$$\dot{\alpha}_4 = \frac{l_{bk2}^2 l_{bk4} \sin \theta_{bk1}}{l_{bk3} l_{bk5} \sin \theta_{bk3} \cos \alpha_4} \left\{ \frac{\cos \theta_{bk3}}{w_2} - \frac{l_{bk3} l_{bk5} \sin \theta_{bk3}}{w_2^2} \right\} \dot{\theta}_{bk1}$$

는 Fig. 5에서 알 수 있다.

토크를 구해내면 다음과 같다.

$$\tau_{bk} = l_{bk5} F_{bk1} \cos \gamma_{bk}$$

여기서  $\gamma_{bk} = \frac{\pi}{2} - \theta_{bk3}$ 인데 버킷관절에서의 최종토크는 아래 식과 같다.

$$F_{bk1} = \frac{\sin \theta_{bk5}}{\sin \theta_{bk4}} F_{bk} \quad (18)$$

### 3.4 실린더의 외부힘

각 실린더에 작용하는 외부 힘은 각 작업장치의 무게가 실린더의 축방향으로 작용하는 힘이다.

#### 3.4.1 Force

Boom cylinder에 작용하는 힘은 boom, arm,

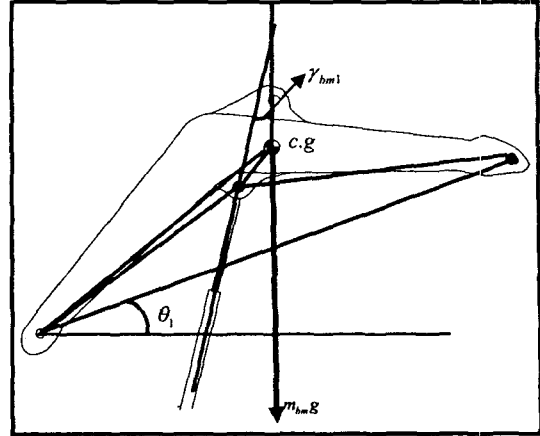


Fig. 6 force acting on boom cylinder by boom

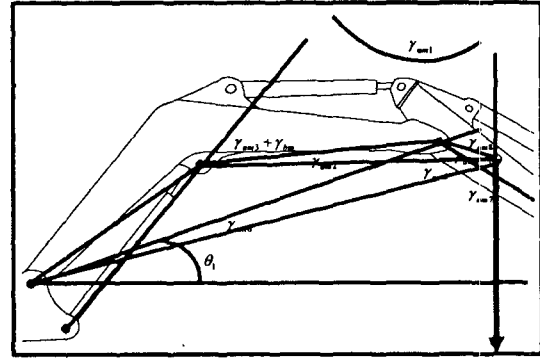


Fig. 7 force acting on boom cylinder by arm

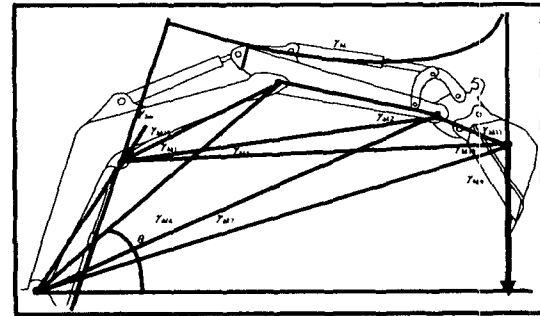


Fig. 8 force acting on boom cylinder by bucket

Bucket의 무게가 작용하는 힘의 합이다.

Fig. 6,7,8에 나타난 붐실린더에 작용하는 힘의 총합은 다음과 같다.

$$F_{bm} = F_{bmbm} + F_{ambm} + F_{bbm} \quad (19)$$

$$F_{bmbm} = m_{bm} g \cos \gamma_{bm1}, \gamma_{bm1} = \frac{\pi}{2} - \theta_1 - \delta_1 - \gamma_{bm} + \delta_2$$

$$F_{ambm} = m_{am} g \cos \gamma_{am1}$$

$$\gamma_{am1} = \pi - \gamma_{bm} - \gamma_{am3} - \gamma_{am2} - \gamma_{am4} - \gamma_{am8}$$

$$F_{bbm} = m_{bk} g \cos \gamma_{bk}$$

$$\gamma_{bk} = \pi - \gamma_{bk13} - \gamma_{bk1} - \gamma_{bk5} - \gamma_{bk14} - \gamma_{bk11}$$

Arm 과 Bucket 의 경우도 Boom 의 경우와 유사하게 풀어나가면 총힘은 다음과 같다.

$$F_{am} = F_{amam} + F_{bkam} \quad (20)$$

$$F_{amam} = m_{am} g \cos \gamma_{amam}, \quad \gamma_{amam} = \gamma_{aa2} + \gamma_{aa6}$$

$$F_{bkam} = m_{bk} g \cos \gamma_{bkam}, \quad \gamma_{bkam} = \gamma_{bkam3} + \gamma_{bkam5}$$

$$F_{bk} = m_{bk} g \cos \gamma_{bkbk} \quad (21)$$

$$\gamma_{bkbk} = \gamma_{bkbk1} + \gamma_{bkbk2} + \gamma_{bkbk3} + \gamma_{bkbk5}$$

### 3.4.1 Torque

각 작업장치의 무게 때문에 각 관절에 걸리는 토크도 역시 Fig. 6, Fig. 7, Fig. 8 에서 구해낼 수 있다.

$$\tau_{bm} = \tau_{bmbm} + \tau_{ambm} + \tau_{bkbm} \quad (22)$$

$$\tau_{bmbm} = m_{bm} g l_{bm} \sin\left(\frac{\pi}{2} - \theta_1 - \delta_1\right)$$

$$\tau_{ambm} = m_{am} g l_{bmjt} \sin \gamma_{am7}, \quad \tau_{bkbm} = m_{bk} g l_{bmjt} \sin \gamma_{bk9}$$

$$\tau_{am} = \tau_{amam} + \tau_{bkam} \quad (23)$$

$$\tau_{amam} = m_{am} g l_{amcyl} \sin(\pi - \gamma_{aa5})$$

$$\tau_{bkam} = m_{bk} g l_{bkcg} \sin(\gamma_{bkam4} + \gamma_{bkam6} + \gamma_{bkam7})$$

$$\tau_{bk} = m_{bk} g l_{bkcyj} \sin(\gamma_{bkbk4} + \gamma_{bk10} + \gamma_{bk9}) \quad (24)$$

## 4. 시뮬레이션

### 4.1 경로설정

버킷 끝단의 경로를 x 방향으로의 직선작업으로만 한정하여 2.7[m]에서 2.2[m]까지로 설정하고 시뮬레이션을 행하여 그 결과를 4.2 절에 나타내었다.

### 4.2 결과

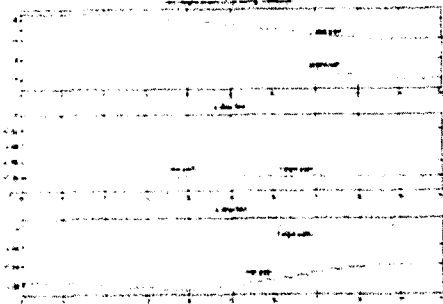


Fig. 9 target path & real path of bucket tip

Fig. 9,10,11,12 에 원점좌표계에서 바라본 버킷 끝단의 x,y,z 방향 위치를, 각 액츄에이터 내에서의 압력,유량,부하압력을, 목표경로를 추종하기 위한 관절에서의 각도값과 각속도값을, 목표경로와 최종경로와의 오차값을 각각 나타내었다.

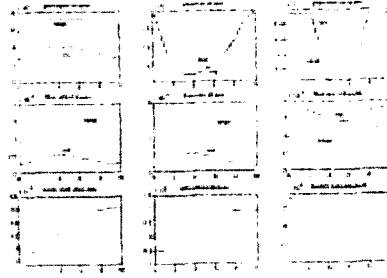


Fig. 10 pressure, flow rate & load pressure

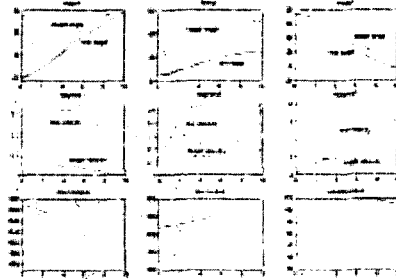


Fig. 11 theta, angular velocity & torque

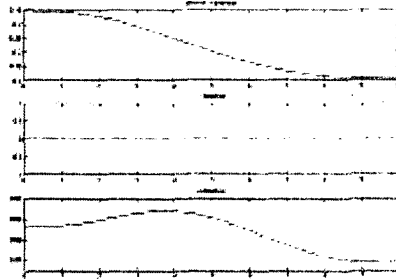


Fig. 12 error each direction

## 4. 결론

본 연구를 통해 필드로봇의로의 적용가능한 유압굴삭기에 비례제어밸브를 추가한 자동굴삭 시스템을 제시하였고 이를 모델링하였다.

결과를 보면 붐,버킷의 경우 어느정도 목표값에 근접하나 암의 경우 오차가 많이 나는 것을 알 수 있었다. 이는 암 재생회로 때문에 생겨난 오차인 것으로 생각되어진다. 재생회로로 인해 실린더 로드측에서 탱크로 나가는 유량이 헤드측으로 흘러들

어가서 유량을 보충해 주는데 이의 무시로 인한 오차이므로 추후 재생회로에 대한 추가연구가 필요한 부분이다.

암에서의 각도오차로 인해 버켓 끝단의 경로는 x 방향뿐 아니라 z 방향으로의 오차도 발생하게 되었다.

본 연구에서의 모델링으로 인해 자동굴삭 시스템의 각 부분에서의 상태 변화를 예측할 수 있는 근간을 마련할 수 있었고 이는 구축중인 자동굴삭 시스템에서의 연구에도 많은 도움이 되리라 생각되어진다.

또한 재생회로의 추가와 더불어 적당한 제어기의 선정,장착으로 목표궤도에 오차를 줄이면서 접근하는 것이 필요하다.

실제의 자동굴삭 시스템은 센서를 비롯한 하드웨어 부분의 장착은 끝난 상태이며 컨트롤러를 제작중이어서 실험은 행하지 못했다. 추후 연구에서 제어기를 장착한 시뮬레이션 결과와 실차실험에서의 결과를 비교하는 것이 본 연구에서 다루었던 모델링 부분의 정확도를 검증하는 길이 될 것이다.

### 후 기

본 연구는 울산대학교 RRC 의 연구지원에 의해 이루어졌습니다.

### 참고문헌

1. Herbert E. Merritt, "HYDRAULIC CONTROL SYSTEMS", pp. 76 - 173, 1967.
2. J. WATTON, "Fluid power systems",pp. 14 -119,1989.
3. Thomas R. Kane,David A. Levinson, "DYNAMICS" pp. 57 - 258, 1985.
4. A. Frank D'souza,Vijay K. Garg, "Advanced Dynamics", pp. 41 -151,1984.
5. Phillip John McKerrow, "로봇공학" , pp. 173-383, 1994.
6. Takashi Morita,Yoshiyuki Sakswa, "Modeling and Control of power shovel"
7. 서삼준,서호준,박귀태,김동식, "신경회로망을 이용한 유압굴삭기의 일정각 굴삭 제어", KACC,1996.
8. 허준영, "가변구조 제어를 이용한 유압굴삭기의 자동화에 관한 연구", 부산대 박사논문,1989.
9. Mao Hsiung Chiang, "유압굴삭기의 adaptive 위치 제어", Archen 공대 논문, 1998.
10. 김철수, "굴삭기의 유압회로 해석 및 하강주행의 안정성 연구", 한국과학원 석사논문,1980.
11. 서우석, "적응제어를 이용한 Field Robot 의 궤적