

가위형버킷의 운동해석 및 원료 불출능력 향상 방안

박상덕* · 강민성* · 원대희* · 김태주*

(2004년 5월 21일 접수, 2004년 10월 21일 심사완료)

Motion Analysis of Scissors Type Buckets and Schemes for Improving Ore Scooping Performance

Sangdeok Park, Min-Sung Kang, Dae-Heui Won and Tae-Ju Kim

Key Words: Scissors Type Bucket(가위형버킷), Scooping Capacity(불출량), Kinematic Analysis(기구학적 해석), Dynamic Analysis(동역학적 해석)

Abstract

Various types of buckets are used as unloading facilities for raw material at unloading wharfs. Scissors type buckets, among them, has been being used widely because of their short cycle time and structural simplicity. However, the scooping capacity, especially for hardened remainder ore, of some buckets are unsatisfactory because of poor design concept of the buckets. In this study, the effects of the design parameters on the scooping performance of the buckets are investigated under kinematic and dynamic analysis. Further, the schemes and design guidelines for designing new scissors type buckets are also presented to improve ore scooping capacity for hardened remainder ore.

1. 서 론

원료부두에서 원료하역 설비로 여러 가지 형태의 버킷이 사용되고 있으며, 그 중 가위형버킷은 다른 형태의 버킷에 비해 작업주기가 짧아서 작업시간을 단축할 수 있는 등 효율이 높고 구조가 간단하여 정비성이 우수하므로 점차 그 수요가 확대되고 있다. 그러나, 특별한 설계개념이 없이 변경된 버킷의 경우 선박 하부에 다져진 잔여광석에 대한 집광능력이 낮은 문제가 있으며, 다양한 규격의 버킷 개발에 필요한 설계 기준이 없으므로 성능향상을 위한 개선과 신모델 개발이 곤란한 실정이다. 따라서, 가위형버킷의 기구학적, 동역학적 해석을 통하여 원료 하역시 선박 하부의 다져진 잔여광석의 집광능력을 향상시켜서 작업시간을 단축하고, 새로 설계하는 가위형버킷의

성능보장 및 다양한 규격의 버킷 설계에 필요한 설계기준을 확보하는 것이 필요하다.

본 연구에서는 가위형버킷의 기구학, 동역학적 해석을 통하여 가위형버킷의 집광능력에 영향을 주는 인자 및 그에 의한 영향을 조사하고, 이를 바탕으로 새로운 버킷 제작시의 각 설계변수에 따른 버킷의 성능을 예측하며 버킷 설계시의 설계 기준을 제시하고자 한다.

2. 가위형버킷의 기구학적 해석

2.1 가위형버킷의 구조

원료하역부두 등에서 선박에 실린 원료를 하역하는 가위형버킷의 기본구조는 Fig. 1과 같다. 기본적으로 가위형 버킷은 운동의 중심이 되는 힌지형 관절에 두 개의 링크가 연결되어 있다. 한 쪽 링크의 시브(sheave)에는 버킷의 운동을 일으키는 로프가 크레인과 연결되어 있고 이 로프는 다시 버킷을 열고 닫을 수 있도록 운동방향을 바꿔주는 각 링크의 시브로 연결되고 최종적으로 한 링크에 고정되어 있다.

* 책임저자, 회원, 한국생산기술연구원 로봇기술개발본부

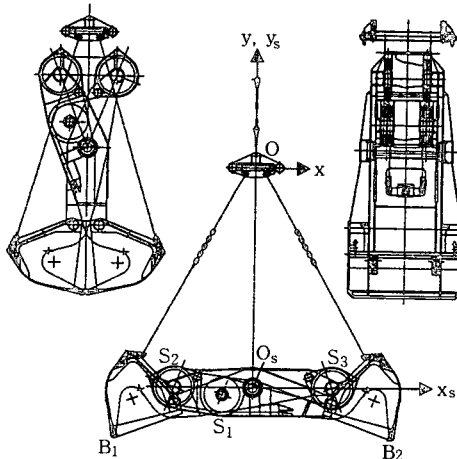
E-mail : sdpark@kitech.re.kr

TEL : (031)400-3967 FAX : (031)400-3969

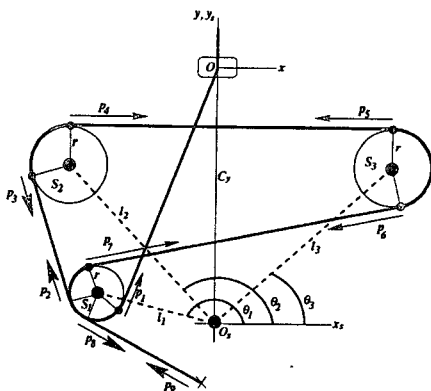
* 한국생산기술연구원 로봇기술개발본부

버킷의 기본위치인 시작위치는 Fig. 1(a)의 가운데 그림과 같이 완전히 열려져 있는 상태이다. 시작위치에서 버킷의 운동을 나타내기 위해 버킷의 전체운동을 나타내기 위한 기본좌표계인 Oxy 좌표계와 버킷 자체의 관계식을 나타내기 위한 버킷좌표계인 $O_s x_s y_s$ 좌표계를 설정한다.

모든 운동은 기본 좌표계로 표시되며, 버킷상의 시브를 포함한 모든 위치는 버킷좌표계로 표시된다. 이 때, 버킷의 중심점 O_s 는 $(0, -C_y)$ 로 표시되고 C_y 는 기본좌표계와 버킷좌표계의 거리를 나타낸다. 버킷의 운동을 표시하기 위한 기본적인 인자는 세 개의 시브 S_1, S_2, S_3 의 위치와 버킷의 끝점 B_1, B_2 의 관계식으로 나타나게 된다.



(a) Structure



(b) Definition of each parameter

Fig. 1 Basic structure of scissors buckets

2.2 버킷의 기구학적 변수

2.2.1 시브의 위치

시브와 관련된 인자들 중 O_s 에서 각 시브까지의 거리 l_i 와 각 시브의 반지름 r_i 는 상수로서 변하지 않는다. x_s 축으로부터 각 시브 중심까지의 각도 θ_i 는 다음과 같은 관계식을 가진다.

$$\theta_1 = \theta_{1_0} - \phi, \quad \theta_2 = \theta_{2_0} - \phi, \quad \theta_3 = \theta_{3_0} + \phi \quad (1)$$

여기서 θ_{i_0} 는 각 θ_i 의 시작위치에서의 각도이고, ϕ 는 버킷이 회전한 각을 나타낸다. 따라서 시작위치에서의 각도 $\phi = 0$ 이다. 버킷의 운동에 의해 거리 C_y 와 각도 ϕ 가 결정되므로 각 시브의 위치는 모두 알 수 있다.

2.2.2 크레인과 운동시브의 관계

Fig. 2에 표시된 것과 같이, 운동시브 S_1 과 크레인은 다음과 같은 관계를 갖는다. p_{c1} 은 크레인에서 운동시브의 중심과의 거리이고 p_1 은 크레인과 운동시브의 접점과의 거리를 나타낸다. 따라서 p_1 이 실제 로프의 길이를 나타내게 된다. 각도 α_1 은 C_y 와 l_1 이 이루는 각으로 $\alpha_1 = \theta_1 - 90^\circ$ 로 표시된다.

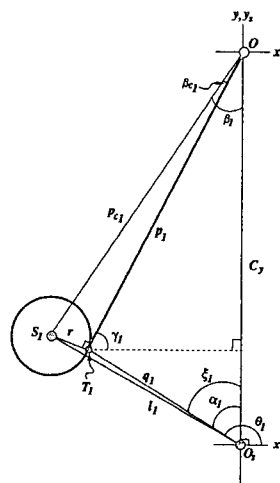


Fig. 2 Kinematic relation between the crane and the sheave S_1

Fig. 2에서 $\triangle OS_1T_1$ 과 $\triangle OS_1O_s$ 로부터 p_1 의 크기와 방향은 다음과 같다.

$$p_1^2 = l_1^2 + C_y^2 - r^2 - 2l_1C_y\cos\alpha_1$$

$$\angle p_1 = 90^\circ - (\beta_1 - \beta_{c_1}) \quad (2)$$

여기서, C_y 는 운동식으로부터 계산되어지고, β_1 , β_{c_1} 은 각각 다음으로부터 구해진다.

$$\cos\beta_1 = \frac{p_{c_1}^2 + C_y^2 - l_1^2}{2p_{c_1}C_y}, \quad \sin\beta_1 = \frac{l_1}{p_{c_1}}\sin\alpha_1,$$

$$\sin\beta_{c_1} = \frac{r}{p_{c_1}}, \quad \cos\beta_{c_1} = \frac{p_1}{p_{c_1}}$$

$\triangle OT_1O_s$ 에서 q_1 의 크기와 방향은 각각

$$q_1^2 = p_1^2 + C_y^2 - 2p_1C_y\cos(\beta_1 - \beta_{c_1})$$

$$\angle q_1 = \xi_1 + 90^\circ \quad (3)$$

와 같으며, 여기서 ξ_1 은 다음으로부터 구해진다.

$$\sin\xi_1 = \frac{p_1}{q_1}\sin(\beta_1 - \beta_{c_1}), \quad \cos\xi_1 = \frac{q_1^2 + C_y^2 - P_1^2}{2q_1C_y}$$

2.2.3 운동시브와 왼쪽 시브의 관계

Fig. 3은 운동시브 S_1 과 왼쪽 시브 S_2 의 관계를 보여준다. 두 시브 사이의 거리는 항상 같은 거리 l_{12} 로 나타나는데 그 크기는 다음과 같다.

$$l_{12}^2 = l_1^2 + l_2^2 - 2l_1l_2\cos(\theta_1 - \theta_2) \quad (4)$$

원점 O_s 와 점 P_2 까지의 벡터 q_2 의 크기와 각도는 각각 다음과 같다.

$$q_2^2 = l_1^2 + r^2 - 2rl_1\cos\xi_2$$

$$\angle q_2 = \theta_1 + \xi_3 \quad (5)$$

여기서, ξ_1, ξ_2, ξ_3 는 각각 다음과 같이 구해진다.

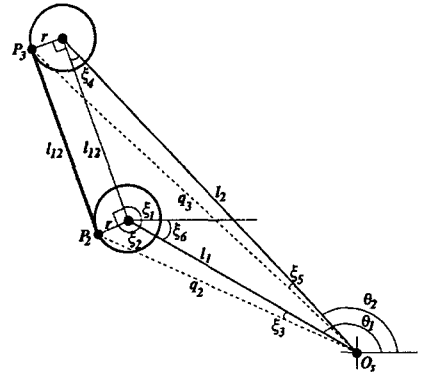


Fig. 3 Kinematic relation between the sheaves S_1 and S_2

$$\cos\xi_1 = \frac{l_2^2 - l_{12}^2 - l_1^2}{2l_{12}l_1}, \quad \sin\xi_1 = \frac{l_2}{l_{12}}\sin(\theta_1 - \theta_2),$$

$$\xi_2 = 360^\circ - (\xi_1 + 90^\circ),$$

$$\cos\xi_3 = \frac{r^2 - l_1^2 - q_2^2}{2l_1q_2}, \quad \sin\xi_3 = \frac{r}{q_2}\sin\xi_2$$

원점 O_s 와 왼쪽 시브의 점 P_3 까지의 거리를 나타내는 벡터 q_3 의 크기와 각도는 다음과 같다.

$$q_3^2 = r^2 + l_2^2 - 2rl_2\cos(\xi_4 + 90^\circ)$$

$$\angle q_3 = \theta_2 + \xi_5 \quad (6)$$

여기서, ξ_4 와 ξ_5 는 각각 다음에서 구해진다.

$$\cos\xi_4 = \frac{l_1^2 - l_2^2 - l_{12}^2}{2l_2l_{12}}, \quad \sin\xi_4 = \frac{l_1}{l_{12}}\sin(\theta_1 - \theta_2),$$

$$\cos\xi_5 = \frac{r^2 - q_3^2 - l_2^2}{2l_2q_3}, \quad \sin\xi_5 = \frac{r}{q_3}\sin(\xi_4 + 90^\circ)$$

2.2.4 운동시브와 오른쪽 시브의 관계

운동시브 S_1 과 오른쪽 시브 S_3 의 관계와 운동을 기술하기 위해서는 로프에 해당하는 벡터 p_4 의 길이와 방향을 알아야 하며, 버킷의 원점 O_s 에서 각 시브와 로프가 접하는 점 T_1 과 T_3 까지의 거리벡터 q_4 와 q_3 의 길이 및 각도를 계산하여야 한다.

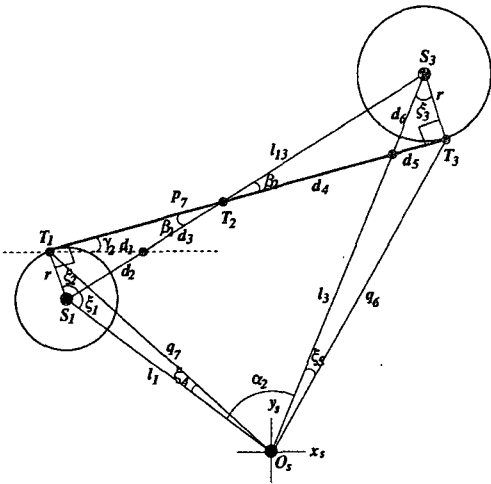


Fig. 4 Kinematic relation between the sheaves S_1 and S_3

(a) p_7 의 계산

두 시브 사이의 거리 l_{13} 는 Fig. 4의 $\triangle S_1 S_3 O_s$ 로부터

$$l_{13}^2 = l_1^2 + l_3^2 - 2l_1 l_3 \cos \alpha_2 \quad (7)$$

이며, $\alpha_2 = \theta_1 - \theta_3 = \theta_{1s} - \theta_{3s} - 2\phi$ 이다. p_7 의 길이와 각도는 닦은풀 성질에서 각각 다음과 같다.

$$p_7^2 = l_{13}^2 - (2r)^2 \quad (8)$$

$$\sin \gamma_2 = \frac{d_3}{d_1} \sin \beta_2, \quad \cos \gamma_2 = \frac{(\frac{p_7}{2})^2 + d_1^2 - d_3^2}{p_7 d_1} \quad (9)$$

여기서,

$$d_1^2 = (\frac{p_2}{2})^2 + d_3^2 - p_2 d_3 \cos \beta_2 \quad (10)$$

$$d_3 = \frac{r^2 + l_{13}^2/4 - r_1 l_{13} \cos \xi_2 - p_7^2/4}{l_{13} - p_7 \cos \beta_2 - 2r \cos \xi_2}$$

이고, 각도 β_2 와 ξ_2 는 다음과 같은 관계에서 구할 수 있다.

$$\sin \beta_2 = \frac{2r}{l_{13}}, \quad \cos \beta_2 = \frac{p_2}{l_{13}} \quad (11)$$

$$\xi_2 = 90^\circ - \beta_2$$

(b) q_6 의 계산

$\triangle T_2 T_3 S_3$ 로부터

$$d_5 = \frac{l_{13}^2/4 + p_7^2/4 - l_{13} p_7 \cos \beta_2 / 2 - r^2}{p_7 - l_{13} \cos \beta_2} \quad (12)$$

이고, 각도 ξ_3 는 $\tan \xi_3 = \frac{d_5}{r}$ 로 표시된다.

q_6 의 거리와 각도는 $\triangle T_3 S_3 O_s$ 로부터 각각

$$q_6^2 = r^2 + l_3^2 - 2r l_3 \cos \xi_3 \quad (13)$$

$$\angle q_6 = \theta_3 - \xi_5$$

이며, ξ_5 는 다음에서 구해진다.

$$\sin \xi_5 = \frac{r}{q_6} \sin \xi_3, \quad \cos \xi_5 = \frac{l_3^2 + q_6^2 - r^2}{2l_3 q_6}$$

(c) q_7 의 계산

버킷의 원점 O_s 에서 운동시브 위의 점 T_1 까지 거리벡터 q_7 의 크기와 방향은 $\triangle T_1 S_1 O_s$ 에서 다음과 같이 주어진다.

$$q_7^2 = r^2 + l_1^2 - 2r l_1 \cos (\xi_1 + \xi_2) \quad (14)$$

$$\angle q_7 = \theta_1 - \xi_4$$

여기서, 각도 ξ_1 은 $\triangle S_1 S_3 O_s$ 로부터 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\sin \xi_1 = \frac{l_3}{l_{13}} \sin \alpha_2, \quad \cos \xi_1 = \frac{l_1^2 + l_{13}^2 - l_3^2}{2l_1 l_{13}} \quad (15)$$

또한, 각도 ξ_4 는 다음과 같이 구해진다.

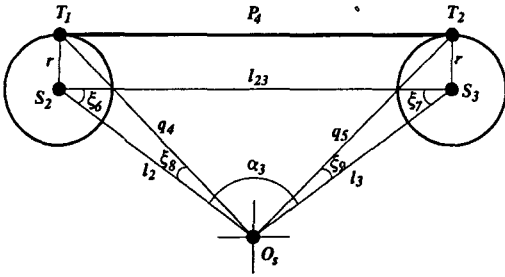


Fig. 5 Kinematic relation between the sheaves S_2 and S_3

$$\sin \xi_4 = \frac{r}{q_7} \sin(\xi_1 + \xi_2), \quad \cos \xi_4 = \frac{l_1^2 + q_7^2 - r^2}{2l_1q_7}$$

2.2.5 왼쪽 시브와 오른쪽 시브의 관계
 먼저 두 시브 사이의 거리 l_{23} 은 로프 사이의 거리 p_4 와 같고 다음과 같이 표시된다.

$$l_{23}^2 = p_4^2 = l_2^2 + l_3^2 - 2l_2l_3\cos\alpha_3 \quad (16)$$

여기서, $\alpha_3 = \theta_2 - \theta_3 = \theta_{2_0} - \theta_{3_0} - 2\phi$ 이고, p_4 의 각도는 항상 0이다, 즉, $\angle p_4 = 0^\circ$. 버킷의 원점 O_5 에서 왼쪽시브의 점 T_1 까지의 거리벡터 q_4 는 $\Delta T_1S_2O_5$ 로부터

$$q_4^2 = r^2 + l_2^2 - 2rl_2\cos(\xi_6 + 90^\circ) \quad (17)$$

이고, 각도 ξ_6 는 $\Delta S_2S_3O_5$ 에서 $\sin \xi_6 = \frac{l_3}{l_{23}} \sin \alpha_3$ 로 주어진다.

q_4 의 각도를 구하기 위하여 먼저 $\Delta T_1S_2O_5$ 에서 각도 ξ_8 을 구하면 $\sin \xi_8 = \frac{r}{q_4} \sin(\xi_6 + 90^\circ)$ 가 되고 q_4 의 각도 $\angle q_4 = \theta_2 - \xi_8$ 이다. 오른쪽 시브에 대한 관계인 q_5 는 위와 비슷한 방법으로 구하게 되는데, 먼저 $\Delta T_2S_3O_5$ 로부터 q_5 의 길이와 각도는 다음과 같이 구해진다.

$$q_5^2 = r^2 + l_3^2 - 2rl_3\cos(\xi_7 + 90^\circ) \quad (18)$$

$$\angle q_5 = \theta_3 + \xi_9$$

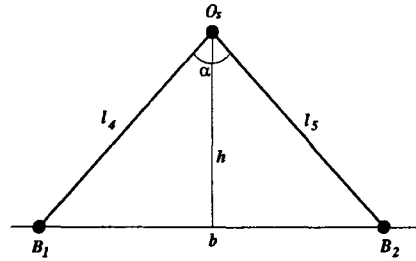


Fig. 6 Relation between the linear and rotational motion

여기서, ξ_7 은 $\Delta S_2S_3O_5$ 로부터 $\sin \xi_7 = \frac{l_2}{l_{23}} \sin \alpha_3$, ξ_9 은 $\Delta T_2S_3O_5$ 로부터 $\sin \xi_9 = \frac{r}{q_5} \sin(\xi_7 + 90^\circ)$ 로 주어진다.

2.3 가위형버킷의 기구학적 해석

2.3.1 버킷의 직선운동

버킷의 직선운동은 버킷의 회전에 의해서 발생하는 경우만을 고려하였다. 로프를 당길 경우, 로프에 의한 회전운동이 먼저 발생하고 회전운동이 끝난 다음 직선운동이 발생한다. 따라서, 버킷의 직선운동은 버킷의 회전운동에 의해서만 발생하게 된다.

Fig. 6에 표시된 것과 같이 버킷의 끝점 B_1 과 B_2 는 지면에 닿아 있으므로, 끝점의 y 축 좌표는 회전운동이 끝날 때까지 일정한 좌표를 유지하게 된다. 이 경우 중심의 y 좌표는 버킷의 각과 다음과 같은 관계를 갖는다.

$$h = l_4 \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right), \quad \alpha = \theta_{5_0} - \theta_{4_0} - 2\phi \quad (19)$$

α 의 각속도는 $\dot{\alpha} = -2\dot{\phi}$ 이다. 그리고 대칭을 위해서 버킷 끝의 길이 l_4 와 l_5 는 같은 길이를 가진다. 위의 관계를 이용하여 속도관계를 얻으면 다음 식과 같다.

$$\dot{h} = -l_4 \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) \frac{\dot{\alpha}}{2} = l_4 \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) \dot{\phi} \quad (20)$$

식 (20)은 버킷의 회전에 의해 발생하는 버킷의

원점 O_s 의 y 방향 변화를 나타내는 것이다. 따라서 앞 절에서 설명한 버킷 원점의 길이 C_y 와는 다음과 같은 관계를 가진다.

$$\dot{C}_y = -\dot{h} = -l_4 \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) \dot{\phi} \quad (21)$$

2.3.2 버킷의 회전운동

버킷의 회전운동은 각도 ϕ 로 표시되며 다음과 같은 로프의 관계식으로부터 유도된다.

$$p_1 + p_2 + p_4 + p_7 = l_0 - v_r t \quad (22)$$

여기서, l_0 는 시작위치에서의 로프의 길이를 나타내며 상수이고 p_i 는 앞 절에서 기술한 시브의 관계에서 구할 수 있다. v_r 은 로프를 당기는 속도이고, 따라서 $-v_r t$ 는 t 시간 동안, 당겨진 로프의 길이를 나타내게 된다. 속도관계를 얻기 위해 위의 식을 미분하면 다음 식이 얻어진다.

$$\dot{p}_1 + \dot{p}_2 + \dot{p}_4 + \dot{p}_7 = -v_r \quad (23)$$

여기서, p_2 는 상수이므로 $\dot{p}_2 = 0$ 이다. 나머지 \dot{p}_i 는 각각 다음과 같다.

$$\dot{p}_1 = \frac{C_y - l_1 \cos \alpha_1}{p_1} \dot{C}_y + \frac{l_1 C_y \sin \alpha_1}{p_1} \dot{\alpha}_1 \quad (24)$$

$$\dot{p}_4 = \frac{l_2 l_3}{p_4} \dot{\alpha}_3 \sin \alpha_3 \quad (25)$$

$$\dot{p}_7 = \frac{l_{13}}{p_7} = \frac{l_1 l_3}{p_7} \sin \alpha_2 \dot{\alpha}_2 \quad (26)$$

여기서, $\dot{\alpha}_1 = -\dot{\phi}$, $\dot{\alpha}_2 = \dot{\alpha}_3 = -2\dot{\phi}$ 이다.

2.3.3 버킷의 회전운동 방정식

식 (24), (25), (26) 및 (21)을 식 (23)에 대입하여 정리하면 회전운동의 속도를 $\dot{\phi}$ 의 관계로 표시할 수 있고, 이로부터

$$\dot{\phi} = \frac{v_r}{k_\phi} \quad (27)$$

의 관계를 구할 수 있다. 여기서,

$$k_\phi = \frac{l_1 C_y \sin \alpha_1}{p_1} + \frac{2l_2 l_3}{p_4} \sin \alpha_3 + \frac{2l_1 l_3}{p_7} \sin \alpha_2 + \frac{C_y - l_1 \cos \alpha_1}{p_1} l_4 \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) \quad (28)$$

이다. 버킷의 회전각도는 위의 회전각속도 $\dot{\phi}$ 를 적분하여 구할 수 있다. 시작위치에서는 회전각도가 없으므로 각도 $\phi_0 = 0$ 이다.

3. 가위형버킷의 동역학적 해석

Fig. 7은 동역학 관계식을 구하기 위한 여러 인자들을 보여 주고 있다. 대부분의 인자들은, 앞장의 기구학 관계식에 의해 구할 수 있으며, 나머지 관계식들은 다음과 같이 구할 수 있다. 먼저, 버킷의 관성모멘트와 위치는 설계도면으로부터 구해지며 이 값은 설계가 끝나면 상수로 고정되게 된다.

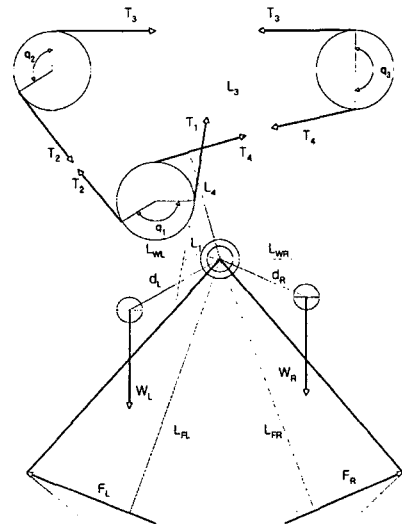


Fig. 7 Distribution of forces and tensions applied to the scissors bucket for dynamic analysis

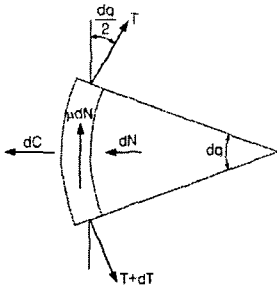


Fig. 8 Tension reduction due to friction

3.1 장력의 계산

시브 사이에서 힘을 전달하는 와이어의 장력은 마찰 때문에 손실이 발생한다. 먼저, Fig. 8을 참고로 하여 반지름방향의 평형관계를 고려하면 다음과 같은 관계가 성립한다.

$$dN = T \sin\left(\frac{dq}{2}\right) + (T + dT) \sin\left(\frac{dq}{2}\right) - dC \quad (29)$$

$$:= Tdq - dC$$

Fig. 8에서 접선방향의 평형관계로부터 마찰계수 μ 인 시브에 의한 장력 손실은 다음과 같은 Eytelwein 식으로 표현된다.

$$\frac{T_1}{T_2} = e^{\mu q} \quad (30)$$

3.2 반발력의 계산

지면의 반발력에 의해 생기는 힘은 버킷의 전체 운동을 지배하는 가장 중요한 힘이다. 이 힘이 강하면 버킷은 회전운동보다 직선운동을 많이 하게 되므로 버킷의 작업에 큰 영향을 미치게 된다. 지면에서의 정확한 반발력을 계산하기 위해서 다음과 같은 가정을 하였다. 반발력 F_{r_i} 의 방향은 버킷의 운동방향과 수직으로 발생한다. 따라서, 반발력은 버킷중심에서 버킷 끝까지의 거리 b_i 에 수직인 방향이 된다. 그리고 반발력의 전체 크기 F_{r_i} 는 다음과 같이 주어진다[1-5].

$$F_{r_i} = k_p \left[k_s bh + \mu N + \epsilon \left(1 + \frac{v_s}{v_b} \right) bh \sum_i \Delta x_i \right] \quad (31)$$

여기서, k_p, k_s 는 각각 지면과 관계된 저항계수

로, b, h 는 각각 버킷의 두께와 높이, μ 는 버킷과 지면과의 마찰계수, N 은 버킷이 지면에 작용하는 압력, ϵ 은 버킷에 광물이 채워질 때 발생하는 저항계수, v_s, v_b 는 각각 버킷에 채워진 광물의 부피와 버킷의 부피, Δx_i 는 그 순간에서의 버킷의 x 방향 운동 거리이다. 해석에서 사용된 각 상수의 값은 $k_p = 1.0005, k_s = 5500, \mu = 0.1, N = g = 1 \text{ kgm/s}^2, \epsilon = 55000 \text{ kg/(m}^2/\text{s}^2)$ 이다.

3.3 동역학 식의 유도

3.3.1 힘의 평형

x 방향 힘의 균형은 버킷이 완전히 대칭관계를 이루면 나타나지 않는다. 즉, 버킷이 작업을 하는 동안 옆으로 전혀 움직이지 않게 된다. 하지만, 실제 버킷은 시브를 감고 있는 로프의 비대칭성으로 인해 힘의 균형이 완전히 이루어 지지 않고 다음과 같은 관계를 가지며 움직인다.

$$(M_L + M_R)\ddot{x} = T_{1x} - F_{Lx} + F_{Rx} \quad (32)$$

여기서, M_L 은 왼쪽 버킷의 질량이고 M_R 은 오른쪽 버킷의 질량이다. 위의 식에서 보는 바와 같이 x 방향의 운동은 시브의 비대칭에 의한 힘 T_{1x} 과 반발력의 비대칭성에 의한 힘 $F_{Lx} + F_{Rx}$ 에 의해 결정된다.

크레인이 로프를 위로 당김으로써 발생하게 되는 y 방향 힘의 균형은 다음과 같다.

$$(M_L + M_R)\ddot{y} = T_{1y} - W_L - W_R + F_{Ly} + F_{Ry} \quad (33)$$

위의 식에서 보는 바와 같이 y 방향의 운동은 크레인에서 로프를 당기는 힘 T_{1y} 과 버킷의 자중에 의한 힘 $-W_L - W_R$, 그리고 반발력에 의한 힘 $F_{Ly} + F_{Ry}$ 으로 나타나게 된다. 많은 양의 원료를 집광하기 위해서는 y 방향의 운동이 가능하면 적게 일어나야 한다. 따라서 반발력은 적고 버킷의 자중은 커야함을 알 수 있다. 또한 크레인이 로프를 당기는 장력도 작아야 하지만, 이 장력은 버킷이 지면을 파는 회전운동과도 관련이 있으므로 이에 대한 고려가 필요하다.

3.3.2 모멘트의 평형

버킷의 회전운동, 즉, 원료를 배출하는 운동은 모멘트 평형관계로부터 다음과 같이 구해진다.

$$(I_L + I_R)\ddot{\theta} = 2[T_1L_1 + 2(T_3L_3 + T_4L_4)] + W_L L_{WL} + W_R L_{WR} - F_L L_{FL} - F_R L_{FR} \quad (34)$$

여기서, I_L 과 I_R 는 각각 왼쪽과 오른쪽 버킷의 관성모멘트이다.

4. 설계변수 변화에 따른 집광능력 변화

4.1 해석용 시뮬레이터

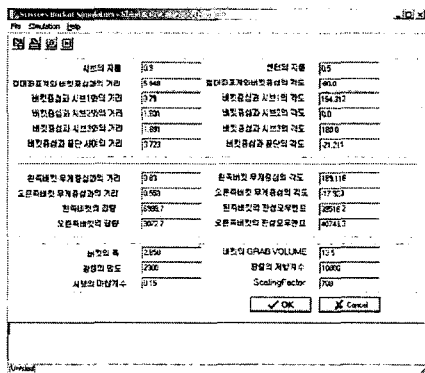
가위형버킷의 설계변수 변화에 따른 집광능력의 변화를 알아보기 위해 기구학, 동역학 방정식을

Table 1 Parameters for 13.5m³ volume bucket

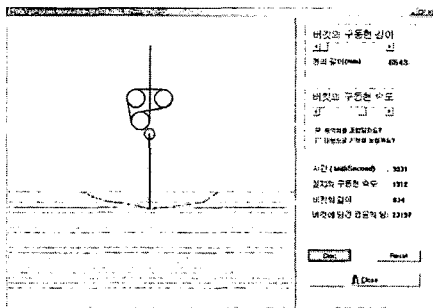
| | | | |
|-------------|--------|----------------|---------|
| 시브의 지름 | 0.9 | 센터의 지름 | 0.5 |
| 버킷중심의 거리 | 5.948 | 버킷의 중심각도 | -90.0 |
| 시브 1의 거리 | 0.79 | 시브 1의 각도 | 194.312 |
| 시브 2의 거리 | 1.891 | 시브 2의 각도 | 0.0 |
| 시브 3의 거리 | 1.891 | 시브 3의 각도 | 180.0 |
| 끝단까지의 거리 | 3.723 | 끝단의 각도 | -21.211 |
| 왼쪽 무게중심의 거리 | 0.83 | 왼쪽 무게중심의 각도 | 189.116 |
| 오른쪽 무게중심 거리 | 0.558 | 오른쪽 무게중심의 각도 | -17.923 |
| 왼쪽 질량 | 6999.7 | 왼쪽 관성모멘트 | 39516.2 |
| 오른쪽 질량 | 9072.7 | 오른쪽 관성모멘트 | 40743.3 |
| 버킷의 폭 | 2.850 | Grab Volume | 13.5 |
| 광물의 밀도 | 2300 | 광물의 저항계수 | 10000 |
| 시브의 마찰계수 | 0.15 | Scaling Factor | 700 |

이용하여 Fig. 9와 같은 해석용 시뮬레이터를 개발하였다. Fig. 9(a)와 같은 변수입력창에 가위형버킷의 각 설계변수와 작업대상물의 물성치를 입력하고 해석을 실행하면 Fig. 9(b)와 같이 버킷의 광물 배출량과 배출깊이 등을 나타낸다.

해석에 사용된 가위형버킷은 13.5m³의 배출부피를 가지는 것으로 그 설계변수 및 작업대상 광물의 물성치는 Table 1과 같다. Fig. 9에 보인 해석용 시뮬레이터를 이용하여 작업대상 광물의 저항계수, 시브의 마찰계수 및 버킷의 기구학적 변수의 변화에 대해 운동시브를 하나(single) 또는 좌우 대칭으로 두 개(double) 가진 버킷의 집광시의 배출깊이 및 배출량의 변화를 알아보았다.



(a) Input window of the simulator



(b) Output window of the simulator

Fig. 9 The software simulator for analyzing the performance of the scissors bucket with respect to the change of design parameters

4.2 설계변수 변화에 따른 집광능력 변화

Fig. 10은 광물의 저항계수 변화에 따른 가위형버킷의 배출량 변화를 나타낸다. Fig. 10의 결과에 의하면 광물의 저항계수가 커질수록 배출깊이와 배출량을 작아지는 것을 알 수 있다. 또한, 운동시브를 하나 가진 버킷과 운동시브를 두개 가진 버킷의 집광능력의 차이는 크지 않다.

Fig. 11은 시브의 마찰계수의 변화에 따른 가위형버킷의 배출량 변화를 나타낸다. 가위형버킷의 집광능력에 영향을 주는 다른 인자들에 비해 시브의 마찰계수의 변화는 집광능력에 크게 영향을 준다. 가위형버킷의 운동은 권상되는 로프에 의해 발생하며, 버킷을 달리게 하는 힘은 권상 로

프와 버킷의 무게에 의해서 생긴 로프의 장력이 양쪽 시브를 서로 당기기 때문에 생긴다. 따라서, 양쪽 시브를 당기는 힘을 되도록 크게 하면 집광 능력을 향상시킬 수 있다.

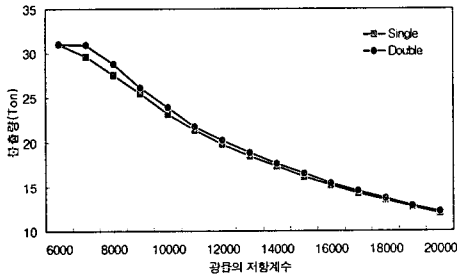


Fig. 10 Variation of the scooping capacity of the scissors bucket with respect to the resistance of mineral ore

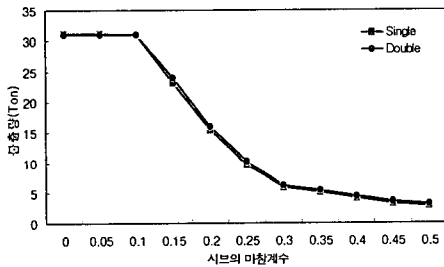


Fig. 11 Variation of the scooping capacity of the scissors bucket with respect to the friction of each sheave

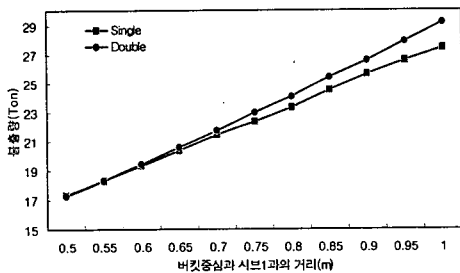


Fig. 12 Variation of the scooping capacity of the scissors bucket with respect to the distance between the center of the bucket and the sheave 1

시뮬레이션에 의하면 마찰계수가 0.3 이상이면 작동 중에 버킷의 끝에 가해진 반력에 의해 로프의 권상에 따라 버킷 전체가 따라 올라가는 등 불안정한 동작을 나타내며 거의 원료불출이 불가능하다. 시브의 마찰계수가 0.1에서 0.2로 증가되면 시브에서의 마찰에 의해 로프의 장력에 손실이 생기기 때문에 불출량은 1/2 이하로 줄어든다. 따라서, 각 시브에서의 마찰계수를 되도록 작게 하여 버킷의 운동을 일으키게 하는 로프의 장력의 손실을 최대한 줄이는 것이 대단히 중요하다.

버킷의 중심으로부터 시브1까지의 거리가 커지면 같은 힘에 대해서도 버킷 중심에 미치는 토크가 증가하므로 버킷 끝에서의 접촉력이 커진다. Fig. 12는 버킷 중심과 시브1 사이의 거리 변화에 따른 불출량의 변화를 나타낸다. 13.5m³ 버킷의 경우 버킷 중심과 시브1 사이의 거리가 0.79m이며, 이 거리가 0.1m 증가할 경우 운동시브를 하나 가진 버킷의 불출량은 약 10% 증가한다.

앞에서 살펴본 바와 같이 가위형버킷이 닫히면서 집광할 수 있도록 하는 힘은 로프의 권상에 따라 시브2와 시브3 사이의 로프가 서로 당기는 장력이 생기면서 버킷의 중심에 대해 토크를 발생하기 때문이다. 따라서, 버킷 중심에서 시브2, 시브3 사이의 거리를 크게 하면 버킷 중심에 대한 토크가 커지면서 집광능력이 향상된다. Fig. 13은 버킷중심과 시브2와의 거리 변화에 따른 불출량의 변화를 보여준다. Fig. 13의 결과에 의하면 운동시브를 하나 가진 경우와 두 개 가진 경우의 불출량의 차이는 약 2%이다. 13.5m³ 버킷의 경우 버킷 중심과 시브2 사이의 거리가 1.891m이며, 이 거리가 0.1m 증가할 경우 운동시브를 하나 가진 버킷의 불출량은 약 3% 증가한다.

Fig. 14는 버킷중심과 시브3과의 거리 변화에 따른 불출량의 변화를 보여준다. Fig. 14의 결과에 의하면 버킷중심과 시브3과의 거리 변화에 따른 운동시브를 하나 가진 버킷과 두 개 가진 버킷의 불출깊이와 불출량의 차이는 3% 이내이다.

버킷 끝단에서 걸리는 지면 접촉력에 의해 버킷 중심에 걸리는 토크는 버킷 중심에서 끝단까지의 거리가 커질수록 증가한다. 따라서 버킷 중심에서 끝단까지의 거리가 커지면 시브 2, 시브3의 운동에 의해 버킷 중심에 발생한 토크를 상쇄하므로 그만큼 불출능력이 낮아진다. Fig. 15는 버킷 중심에서 끝단까지의 거리의 변화에 따른

불출량의 변화를 보여준다. 13.5m³ 버킷의 경우 버킷 중심과 끝단 사이의 거리가 3.7231m이며, 이 거리가 0.1m 감소할 경우 운동시브를 하나 가진 버킷의 불출량은 약 4% 증가한다.

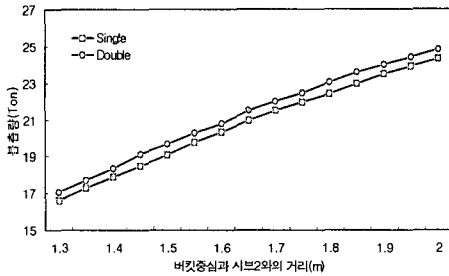


Fig. 13 Variation of the scooping capacity of the scissors bucket with respect to the distance between the center of the bucket and the sheave 2

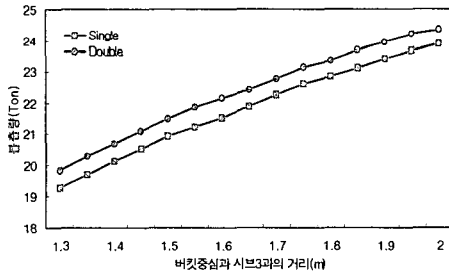


Fig. 14 Variation of the scooping capacity of the scissors bucket with respect to the distance between the center of the bucket and the sheave 3

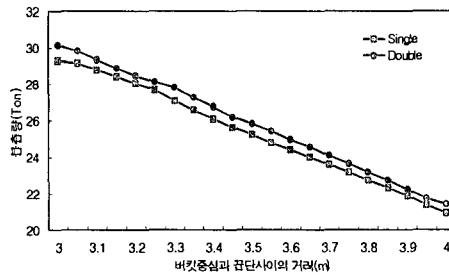


Fig. 15 Variation of the scooping capacity of the scissors bucket with respect to the distance between the center and end of the bucket

가위형버킷의 모멘트 평형방정식에서 버킷 중심 조인트로부터 무게중심까지의 거리를 크게 하면 각가속도가 증가되어 버킷의 작업성능이 향상됨을 알 수 있었다. 이를 확인하기 위해 개발된 해석용 시뮬레이터를 이용하여 버킷의 중심 조인트로부터 무게중심까지의 거리를 증가시켰을 때의 불출능력의 변화를 살펴본다.

Fig. 16 및 17은 각각 왼쪽과 오른쪽 버킷의 무게중심의 거리를 변화시켰을 때의 불출량 변화를 나타낸다. 이 결과로부터 양쪽 버킷의 무게중심을 버킷의 중심 조인트로부터 멀리하면 불출능력이 증가함을 알 수 있다. 그러나, 일반적으로 버킷의 무게중심의 위치를 임의로 옮기는 것은 설계상 어려움이 있으며, 토크를 크게 하기위해 무게중심의 위치를 버킷의 중심조인트로부터 멀리 두면 버킷의 관성모멘트도 그 거리의 제곱에 비례하여 증가하므로 노력에 비해 이득이 작아지거나 오히려 불출능력이 감소될 수 있다.

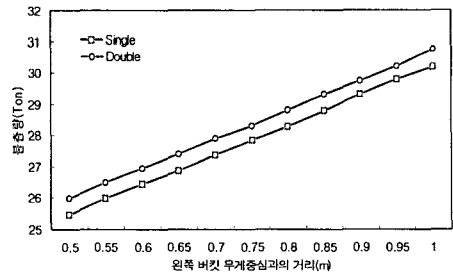


Fig. 16 Scooping capacity of the scissors bucket with respect to the distance between the center and left mass center of the bucket

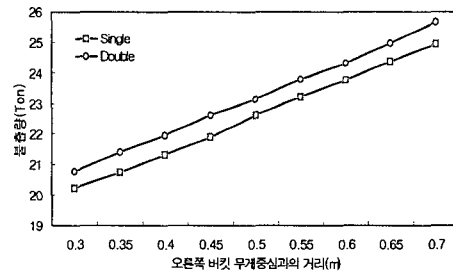


Fig. 17 Scooping capacity of the scissors bucket with respect to the distance between the center and right mass center of the bucket

4.3 가위형버킷의 설계기준

앞서 살펴본 바와 같이 가위형버킷의 집광토크를 크게 하려면 버킷의 무게, 버킷 중심에서 시브1, 2 사이의 거리 및 버킷 중심에서 무게중심까지의 거리를 크게 하거나, 버킷의 관성력을 작게 해야한다. 이 중에서 버킷 중심에서 무게중심까지의 거리를 크게 하면 가위형버킷 암(arm)의 관성력을 크게 할 우려가 있으므로 좋은 방안이 되지 못한다. 따라서, 버킷의 자중을 크게 하는 것이 집광토크를 크게 하는 수단이 될 수 있다. 그러나, 버킷의 자중은 설계기준상 한계가 있고 생산비를 증가시키므로 버킷의 무게, 무게중심까지의 거리, 관성모멘트 및 버킷 중심에서 시브1, 2, 3까지의 거리를 서로 변화시키면서 최적의 값을 찾는 노력이 필요하다.

가위형버킷의 원료불출 능력은 버킷의 날 끝과 불출대상물 사이의 접촉력에 비례하며, 이 접촉력에 가장 큰 영향을 주는 것이 버킷의 무게이다. 따라서, 설계조건이 허락하는 한 버킷을 무겁게 만들면 불출능력이 향상된다. 그러나, 버킷을 무겁게 만드는 것은 제작비가 많이 드는 단점이 있다. 그리고, 버킷의 중심에서 시브1, 2, 3까지의 거리는 가능한 크게 하고, 버킷 중심에서 끝단까지의 거리는 되도록 작게 설계한다. 또한, 각 시브의 마찰계수는 되도록 줄인다.

5. 결 론

본 연구에서 가위형버킷의 기구학, 동역학적 해석을 통해 가위형버킷의 설계원리를 이해하였다. 기구학적 해석을 통해 가위형버킷의 직선운동 및 회전운동 방정식을 도출하였으며, 동역학적 해석을 통하여 가위형버킷 시브 사이의 장력, 불출대상 원료면의 모델링 및 반발력을 계산하였다. 또한, 가위형버킷의 기구학, 동역학 해석용 시뮬레이터를 개발하여 버킷의 각 설계변수 변화에 따른 불출능력의 변화를 살펴보았으며, 집광능력 향상을 위한 기구부 개선방안을 도출하고

새로운 버킷의 설계를 위한 설계기준을 도출하였다.

집광능력 향상을 위한 기구부 개선방안은 다음과 같다. 먼저, 장력의 손실을 방지하기 위해 1) 시브의 마찰계수를 줄이고, 2) 시브와 closing rope의 마찰각을 줄인다. 또한, 버킷 개폐 토오크를 향상하기 위해 3) 버킷의 회전중심에서 무게중심까지의 거리를 증가하고, 4) 버킷의 관성모멘트를 줄이며, 5) 버킷 중심에서 각 시브까지의 거리를 가능한 멀리 하고, 6) 버킷의 중심에서 끝점까지의 거리를 줄이고 버킷의 자중을 가능한 크게 하며, 7) 운동시브를 좌우 대칭으로 설치하여 버킷의 구동현을 수를 증가한다.

참고문헌

- (1) Alekseeva, T.V., Artem'ev, K.A., Bromberg, A.A., Voitsekhovskii, R.I. and U'lyanov, N.A., 1972, "Machines for Earthmoving Work - Theory and Calculation," Mashinostroenie Publishers, Moscow.
- (2) DiMaio, S.P., Salcudean, S.E., Reboulet, C., Tafazoli, S. and Hashtrudi-Zaad, K., 1998, "A Virtual Excavator for Controller Development and Evaluation," *IEEE Conf. on Robotics and Automation*, pp. 52~58.
- (3) Salcudean, S.E., Hashtrudi-Zaad, K., Tafazoli, S., DiMaio, S.P. and Reboulet, C., 1998, "Bilateral Matched Impedance Teleoperation with Application to Excavator Control," *IEEE Conf. on Robotics and Automation*, pp. 133~139.
- (4) Koivo, A.J., Thoma, M., Kocaoglan, E. and Andrade-Cetto, J., 1990, "Modeling and Control of Excavator Dynamics during Digging Operation," *Journal of Aerospace Engineering*, pp. 10~18.
- (5) Singh, S. 1995, "Learning to Predict Resistive Forces During Robotic Excavation," *IEEE Conf. on Robotics and Automation*, pp. 2102~2107.