

# 미장로봇의 운동제어

신동현\*, 한두호\*\*

## The Motion Control of Concrete Floor Finishing Robot

Dong Hun Shin\*, Doo Ho Han\*\*

### ABSTRACT

The 2-trowel type concrete floor finishing robot can move in any direction by adjusting the posture of trowels without any wheels. Since the quality of the smoothed and polished concrete floor is determined by plastering speed, we need to control the velocity of the robot. However, we cannot use the typical motion control method because it is very difficult to measure the velocity of the robot, in contrast to the mobile robots with wheels. To overcome this difficulty, the following are studied in this paper: We found that the robot dynamics has the disturbance depending on its translational speed, and showed that there exists the saturated velocity of the robot which is set by the posture of the trowels, and obtained the relationship between the saturated velocity and the posture in the translation. The result enables us to control the motion of the robot only by adjusting the posture of trowels without measuring the velocity of the robot. Currently, we built the troweling robot and are experimenting its performance with the proposed motion control method.

**Key Words** : Rotary Trowel(회전트로웰), Unbalanced friction force(비대칭 마찰력), Saturated velocity(수렴속도), Motion Control(운동 제어)

### 1. 서론

최근 건설용 기계의 자동화 추세에 따라, 1980년대 중반부터 일본 등의 선진국에서는 건설용 로봇 중 그 필요성이 매우 요구되는 미장로봇들이 여러 종류로 적극 연구 개발되어 왔다. 이러한 미장로봇들은 바닥을 미장하는 회전트로웰 부분과 이동을 담당하는 구동부로 구성된다. 회전트로웰은 보통 3~4개의 흡손으로 구성되며, 이동을 위한 구동부는 바퀴 혹은 무한궤도 등으로 구성된다. 따라서, 이러한 기계의 운동제어는 기존의 이동로봇의 제어에 비하여 새로운 어려움이 없다.<sup>[1]</sup>

그런데, Fig. 1은 현재 서울시립대에 의하여 개발되고 있는 새로운 형태의 미장로봇으로서, 바닥을 미장하는 4개의 흡손으로 구성된 회전 트로웰 2개만으로 구성되며, 바퀴와 같은 별도의 구동 메커니즘이 필요 없이 트로웰과 바닥 사이의 마찰력을 이동을 위한 구동력으로 이용함으로써 임의의 방향으로의 직진과 제자리 회전의 3-DOF 운동이 가능하다. 이에 관한 역동학적 해답은 [2]에 발표된 바 있다. 일본의 TOKIMEC사에서도 이와 유사한 형태의 미장 로봇을 개발한 것으로 알려지고 있지만, 이에 관련된 학술 연구는 발표된 적이 없다.<sup>[3]</sup>

\* 서울시립대학교 정밀기계공학과

\*\* 서울시립대학교 정밀기계공학과 대학원

본 논문에서는 이러한 2개의 회전트로웰만을 가진 미장로봇의 동역학적 특성을 이용하여 직진운동과 회전운동시에 로봇의 속도를 제어할 수 있는 방법을 제시한다.

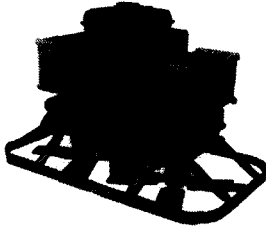


Fig. 1 The concrete floor finishing robot



Fig. 2 Conventional trowel machine

## 2. 운동 제어

Fig. 1과 같은 미장로봇의 운동원리는 Fig. 2의 수동형 미장기계의 운동원리로부터 설명할 수가 있다. 이 기계는 4개의 흡손으로 구성된 회전 트로웰 1개와 조작막대로 구성되어 있으며, 흡손이 회전하면서 콘크리트 바닥을 평평하게 만든다. 그런데, 조작자가 콘크리트 바닥을 미장하며 기계를 이동시키 고자 할 때 기계를 밀거나 끌지 않아도 되며, 단지 조작막대를 상하좌우로 기울임으로써 트로웰(흡손)과 바닥사이의 마찰력을 이용하여 이 미장기계를 쉽게 이동시킬 수 있다. 예를 들어, Fig. 3(a)는 이러한 미장기계를 조작자가 볼 때 오른 쪽으로 기울인 것을 나타낸 것인데, 정확히는 Fig. 3(b)에서처럼 미장 트로웰을 위에서 보아 조작자의 반대 방향인 y 축으로부터  $\phi$  만큼 회전된 y' 축을 중심으로  $\theta$  라디안만큼 트로웰을 기울인 것이다. 이 때, 트로웰(흡손들)이 시계방향으로 회전한다면, 트로웰에 작용하는 마찰력은 조작막대를 기울인 쪽의 마찰력  $f_1$ 이 그 반대쪽 마찰력  $f_2$ 보다 크게 발생하게 된다. 그 이유는 기울인 쪽의 콘크리트 바닥에서 작용하는 반력이 그 반대쪽 보다 더 크기 때문이다.<sup>[2]</sup> 따라서, 이러한 수동형 미장기계를 이동시키는 구동

력은  $f_1 - f_2$ 의 크기로 y' 축 방향으로 발생하게 되어 그 방향으로 움직인다.

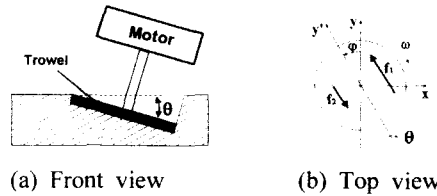


Fig. 3 Trowel tilted by  $\theta$  radian

Fig. 4는 Fig. 1의 미장로봇을 도식적으로 간단히 표현한 그림인데 두 개의 트로웰은 서로 반대 방향으로 같은 양만큼 기울어져 있다. 한편, 두 개의 회전트로웰은 같은 각속도  $\omega$ 로 서로 반대 방향으로 회전하기 때문에 각 트로웰의 회전으로 발생하는 회전토크는 상쇄된다. 그러나 각 트로웰의 마찰구동력은 모두 y' 축 방향으로 발생한다. 따라서, 미장로봇은 y' 축 방향으로 이동하게 된다. 이와 같이, 앞의 수동형 미장기계와 같은 원리로 이 미장로봇은 각 트로웰의 기울이는 방향( $\phi_1, \phi_2$ )을 조절함으로써 임의의 방향으로 직진할 수 있다. 이 때, 각 트로웰에서 발생하는 마찰구동력의 크기는 각 트로웰을 기울이는 경사각( $\theta_1, \theta_2$ )으로 결정된다. 참고자료 [2]에 의하면, 로봇의 속도를 무시하였을 때 마찰구동력의 크기는 식 (1)과 같이 대략적으로  $\theta$ 의 제곱에 비례한다.

$$|F| = k_1 \theta \sqrt{\Delta_0^2 - k_2 \theta^2} \quad (1)$$

여기서,  $k_1$ 과  $k_2$ 는 상수이고,  $\Delta_0$ 는 트로웰을 기울이지 않았을 때 트로웰의 무게에 의한 콘크리트 바닥의 초기 변형량이다.

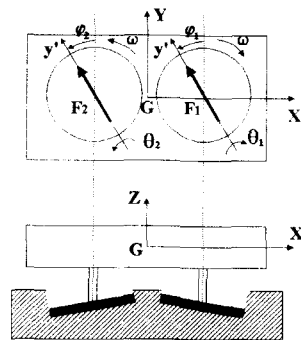


Fig. 4 The top view and the front view of the trowel

한편, 작업자가 미장로봇의 운동을 제어할 때, 작업자는 미장로봇을 직접 보면서 무선 조종기를 통하여 로봇을 조종한다. 또한, 미장 결과를 미장속도가 좌우하기 때문에<sup>[1]</sup>, 위치나 가속도보다는 속도 제어가 필수적이다. 따라서 Fig. 5와 같이 작업자가 미장로봇에 내리는 명령은 속도명령이 일반적이다.

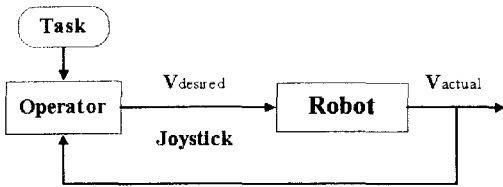


Fig. 5 The velocity control of the troweling robot

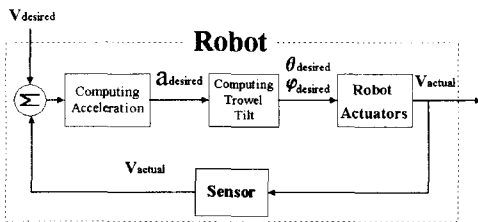
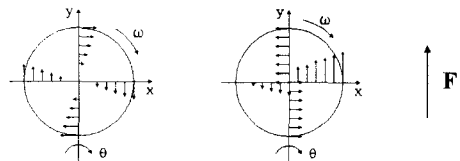


Fig. 6 The feedback velocity control of the troweling robot

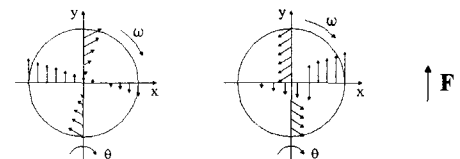
Fig. 6은 미장로봇의 일반적인 속도 제어 방법을 나타낸 것이다. 주어진 속도명령과 현재 속도를 비교하여 필요한 가속도를 결정하고, 이 가속도를 이룰 수 있는 트로웰의 경사각을 계산하여 로봇에 있는 모터가 트로웰을 기울이면, 로봇이 지령속도로 움직이는 방법이다. 이와 같은 피드백 속도 제어에는 속도를 측정하는 것이 필수적이지만, 미장로봇의 속도를 측정할 만한 적당한 방법이 없다. 왜냐하면, 미장로봇은 2개의 회전트로웰과 바닥사이에서 발생하는 마찰력을 구동력으로 이용하기 때문에, 바퀴의 각속도를 이용해서 로봇의 속도를 구하는 일반적인 방법을 사용할 수 없기 때문이다. 또한, 자이로 센서와 가속도센서를 이용하는 방법은 비교적 고가이고, 중력 가속도로 인한 어려움과 로봇 엔진의 심한 진동으로 인한 어려움을 보정하기가 어렵기 때문이다.<sup>[5]</sup> 따라서 본 논문에서는 미장로봇의 특성을 고려한 새로운 미장로봇 속도 제어 방법을 제시한다.

### 3. 트로웰의 속도에 따른 마찰구동력의 변화

Fig. 7는 트로웰이 제자리에서 회전할 때와 트로웰이 y축 방향으로 속도를 가지고 회전할 때의 동역학적 특성을 비교한 것이다. Fig. 7(a)는 트로웰이  $\omega$ 의 속력으로 시계방향으로 회전할 때 트로웰의 x, y축 선상에서의 속도 분포를 나타낸다. 이때, 마찰력은 속도의 반대 방향으로 발생하고 트로웰이 y축에 대해서  $\theta$  라디안만큼 기울어져있기 때문에 트로웰의 마찰력은 Fig. 7(b)와 같이 분포된다. 따라서, 트로웰의 마찰구동력은 Fig. 7(c)와 같이 발생된다. 그러나, 만약 트로웰이 y축 방향으로 움직인다면, 트로웰의 속도 분포가 Fig. 7(d)에서와 같이 변화해서 트로웰의 마찰력은 Fig. 7(e)와 같이 된다. 따라서, 트로웰의 마찰 구동력은 Fig. 7(f)에서와 같이 그 크기가 감소한다.



(a) Velocity when robot is at rest (b) friction (c) resultant force



(d) Velocity when robot has the velocity (e) friction (f) resultant force

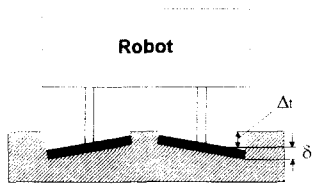
Fig. 7 The change of friction force by the translational motion

여기에서, 우리는 트로웰의 직진 속력이 커지면 커질수록 그 반대 방향으로의 마찰력을 증가시켜, 트로웰을 기울인 축방향으로의 마찰 구동력을 점점 감소시켜 트로웰의 가속력이 점점 감소한다는 것을 알 수 있다. 또한, Fig. 4에서의 미장로봇처럼 회전하고 있는 두 개의 트로웰을 서로 반대 방향으로 일정한 양만큼 기울이면, 미장로봇은 트로웰에서 발생하는 마찰구동력으로 인해 로봇의 직진속력이 점점 증가하다가, 직진속도방향의 반대방향으로 점

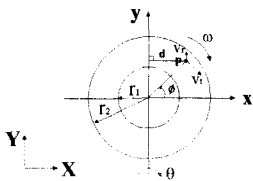
점 증가하는 마찰력으로 인해서 결국에는 마찰구동력이 0이 돼서 로봇은 일정한 속력으로 움직일 것이라는 것을 알 수 있다. 이와 같이 트로웰의 경사각에 대응되는 로봇의 수렴속도가 존재한다면, 우리는 트로웰의 경사각을 조절함으로써 미장로봇의 직진 속력을 제어할 수 있다. 먼저 이 제어방법을 고속도로에서 등속도 운동을 하는 자동차를 예를 들어 설명하면 다음과 같다.

운전자는 자동차의 가속력을 결정하는 가속 페달을 조절함으로써 자동차의 속도를 제어한다. 이 과정을 자세히 살펴보면, 운전자가 가속 페달을 일정하게 밟고 있으면 그에 해당하는 힘이 엔진으로부터 출력되어 자동차는 가속력을 받아 속도가 점점 증가한다. 한편, 증가하는 자동차의 속도에 따라서 공기저항 역시 점점 증가한다. 따라서, 결국 엔진으로부터의 가속력과 공기저항이 같아지고 자동차는 그 속도를 유지하게 된다. 즉, 가속페달에 비례하여 증가하는 저항력(Disturbance)이 있다면 구동력을 조절하는 제어 변수에 해당하는 수렴속도가 존재한다는 것이다.

4. 직진 운동에서의 로봇의 수렴속도



(a) The schematic front view of the robot



(b) Top view of the right side trowel

Fig. 8 Schematic troweling robot

이제, 미장로봇에서도 구동력을 결정하는 트로웰의 자세에 수렴속도가 존재함을 보이고 그 속도를 구한다. 회전운동과 직진운동을 함께 하는 트로웰에 작용하는 마찰구동력을 구하기 위해, 참고자료 [2]에서 사용한 다음의 2가지 모델링을 이용한

다.

첫째, 트로웰과 콘크리트 바닥 사이의 반력을 식 (2)와 같이 모델링한다.

$$N = C\delta^2 \tag{2}$$

여기서, C는 상수이고,  $\delta$ 는 콘크리트의 변형량이다.

둘째, 4개의 흡손이 고속으로 회전하면서 미장일을 하기 때문에, 트로웰을 중앙이 빈 하나의 원판으로 생각한다.

Fig. 8(a)는 미장로봇을 직진시키기 위해서, 두 개의 트로웰을 서로 반대 방향으로  $\theta$  만큼 기울인 것을 나타낸 것이다. Fig. 8(b)는 각속도  $\omega$  로 시계 방향으로 회전하는 Fig. 8(a)의 오른쪽에 있는 트로웰을 위에서 바라본 것으로, y 축에 대해서  $\theta$  라디안만큼 기울어진 회전트로웰을 나타낸다.  $\Delta_t$ 는 트로웰을 기울였을 때 트로웰 중심점에 해당하는 바닥의 변형량으로, 바닥의 하중-변형량 관계식이 식 (2)와 같이 선형관계가 아니므로  $\Delta_t$ 와는 다른 값이며 식 (3)과 같이 표현된다.<sup>[2]</sup>

$$\Delta_t = \sqrt{\Delta_0^2 - \frac{1}{4}(r_1^2 + r_2^2)\theta^2} \tag{3}$$

Fig. 8(b)에서 xy 좌표계는 트로웰 중심에 부착된 지역좌표계이며, 트로웰 내의 임의의 한 점  $p(r, \phi)$ 에서의 트로웰의 중심에 대한 콘크리트 바닥의 수직 변형량을  $\delta$ 로 나타낸다면,  $p(r, \phi)$ 에서 바닥으로부터의 반력 N은 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$N = C(\Delta_t + \delta)^2 \tag{4}$$

Fig. 8(b)에서 경사의 중심축인 y 축에서 점 p까지의 수평거리를 d라 하면, d는 식 (5)와 같이 구할 수 있다.

$$d = r \cos \phi \tag{5}$$

따라서, 트로웰을 미소한 만큼 기울일 때 점  $p(r, \phi)$ 에서의  $\delta$ 는 식 (6)으로 표현되며, 식 (4)의 반력은 식 (7)과 같이 표현할 수 있다.

$$\delta = \theta d = r\theta \cos \phi \tag{6}$$

$$N = C(\Delta_t + r\theta\cos\phi)^2 \quad (7)$$

트로웰이  $v_r$ 의 속력으로  $y$  축으로 직진 운동한다고 가정하면 트로웰의 직진 속도는 다음과 같다.

$$v_y = v_r j \quad (8)$$

여기에서, 트로웰이 회전하기 때문에 트로웰의 중심에 대한 점  $p(r, \phi)$ 의 상대속도는 다음과 같다.

$$v_t = r\omega(\sin\phi i - \cos\phi j) \quad (9)$$

그러면, 점  $p(r, \phi)$ 의 속도는  $v_r$ 과  $v_t$ 를 합해서 구할 수 있다.

$$v = v_r + v_t = r\omega\sin\phi i + (v_r - r\omega\cos\phi)j \quad (10)$$

Coulomb의 마찰력 모델에 의하면, 마찰력  $f$ 의 방향 벡터  $u$ 는 그 점에서의 속도  $v$ 의 방향과 반대이다. 따라서, 점  $p(r, \phi)$ 에서의 마찰력의 방향  $u$ 와 마찰력  $f$ 를 식 (11)과 (12)로 표현할 수가 있다.

$$u = -\frac{v}{|v|} = -\frac{r\omega\sin\phi i + (v_r - r\omega\cos\phi)j}{\sqrt{(r\omega)^2 + v_r^2 - 2r\omega v_r \cos\phi}} \quad (11)$$

$$f = \mu N u$$

$$= -\mu C(\Delta_t + r\theta\cos\phi)^2 \frac{r\omega\sin\phi i + (v_r - r\omega\cos\phi)j}{\sqrt{(r\omega)^2 + v_r^2 - 2r\omega v_r \cos\phi}} \quad (12)$$

여기서  $\mu$ 는 트로웰과 바닥사이의 마찰 계수이다.

이제, 식 (12)로 표현되는 트로웰 내의 한 점에서의 마찰력  $f$ 를 트로웰과 바닥의 접촉면적에 대하여 적분하면, 트로웰 전체에 작용하는 마찰구동력  $F$ 를 구할 수 있다

$$F = \int_{r_1}^{r_2} \int_0^{2\pi} f r d\phi dr \quad (13)$$

그런데, 식 (13)의 적분은 피적분항인 (12)의 분모의 복잡성으로 인해서 해석적으로 적분이 되지 않는다. 따라서, 본 논문에서는 이 문제를 해결하기 위해서 다음과 같은 근사법을 이용한다.

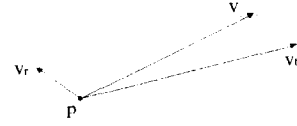


Fig. 9 The components of the velocity at a point on the trowel

식 (12)의 분모는 (11)에서와 같이  $|v|$ 이다. 그런데, Fig. 9에서와 같이 트로웰 내의 한 점  $p$ 에서 트로웰의 회전속도  $v_t$ 의 크기가 미장로봇의 직진속도  $v_r$ 의 크기보다 훨씬 더 크다면,  $|v|$ 는  $|v_t|$ 로 근사할 수 있다. 그러면, 마찰력의 방향  $u$ 는 식 (14)와 같이 표현할 수가 있다.

$$u = -\frac{v}{|v|} \approx -\frac{v}{|v_t|}$$

$$= -\frac{r\omega\sin\phi i + (v_r - r\omega\cos\phi)j}{r\omega} \quad (14)$$

Fig. 10은 실제 미장에 있어서 트로웰 반경에 대한  $|v|$ 와  $|v_t|$ 의 오차( $[1/|v|] \times [ |v| - |v_t| ] \times 100\%$ )를 나타낸 것으로, 그 평균오차가 2.72%로 매우 작다는 것을 알 수 있다.

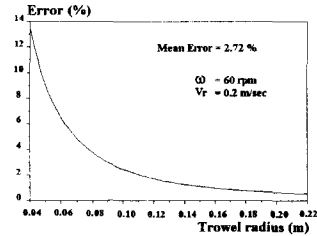


Fig. 10 The error between  $|v|$  with  $|v_t|$

그러므로  $|v|$ 를  $|v_t|$ 로 근사하여 사용한다면, 점  $p$ 의 마찰력은 다음과 같이 간단히 표현할 수 있다.

$$f = -\mu C(\Delta_t + r\theta\cos\phi)^2 \frac{r\omega\sin\phi i + (v_r - r\omega\cos\phi)j}{r\omega} \quad (15)$$

이제, 식 (15)로 표현되는 트로웰 내의 한 점에서의 마찰력  $f$ 를,  $x$  축 방향과  $y$  축 방향 성분으로 나누어 트로웰과 바닥과의 접촉면적에 대하여 적분하면, 식 (16), (17)과 같이 트로웰 전체에 작용하는

마찰구동력  $\mathbf{F}$ 를 구할 수 있다.

$$F_x = - \int_{r_1}^{r_2} \int_0^{2\pi} \mu C (\Delta_1 + r \theta \cos \phi)^2 \sin \phi r d\phi dr = 0 \quad (16)$$

$$F_y = - \int_{r_1}^{r_2} \int_0^{2\pi} \frac{\mu C}{\omega} (\Delta_1 + r \theta \cos \phi)^2 (v_r - r \omega \cos \phi) d\phi dr = -A v_r + B \quad (17)$$

여기에서,

$$A = \frac{\mu C \pi}{\omega} \left\{ 2 \Delta_1^2 (r_2 - r_1) + \frac{1}{3} (r_2^3 - r_1^3) \theta^2 \right\} > 0$$

$$B = \frac{2}{3} \mu C \pi \Delta_1 \theta (r_2^3 - r_1^3) > 0$$

같은 방법으로, Fig. 8의 왼쪽 트로웰에 작용하는 마찰구동력을 구하면 오른쪽 트로웰의 마찰구동력인 식 (16), (17)과 같은 값이 나온다. 그러므로, Fig. 8(a)와 같이 두 트로웰을 y 축에 대하여 서로 반대 방향으로 같은 각도만큼 기울이면, 미장로봇에 작용하는 마찰구동력은 x 축 방향으로는 없고, y 축 방향으로  $2F_y$ 의 크기로 발생하며, 그 크기는 미장로봇이 이동속도  $v_r$ 에 비례해서 감소한다는 것을 알 수 있다.

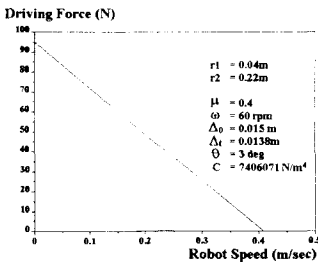


Fig. 11 The driving force of the robot along its speed

Fig. 11은 Fig. 8(a)의 트로웰을 3° 만큼 기울였을 때, 로봇의 직진속력과 마찰구동력의 관계를 나타낸 것이다. 미장로봇의 속력이 증가함에 따라 마찰구동력의 크기가 점점 작아지다가 일정한 크기에 도달하면 그 값이 0이 된다. 즉, 미장로봇은 마찰구동력으로 속력이 점점 증가하다가 구동력의 크기가 0이 되는 순간부터 일정한 속력을 유지하게 된다.

식 (17)의 마찰구동력이 0이 되는 순간의 미장로봇의 수렴속력  $v_s$ 를 (3)을 이용해서 트로웰의 경사각에 대해서 정리하면 식 (18)과 같다.

$$v_s = \frac{C_1 \sqrt{\Delta_0^2 - C_2 \theta^2}}{6 \Delta_0^2 - C_3 \theta^2} \theta \quad (18)$$

여기에서,

$$C_1 : 2\omega(r_1^2 + r_1 r_2 + r_2^2), \quad C_2 : \frac{1}{4}(r_1^2 + r_2^2)$$

$$C_3 : \frac{1}{2}(r_1 - r_2)^2$$

Fig. 12는 트로웰이 60 rpm으로 회전할 때, 트로웰의 경사각에 따른 미장로봇의 수렴속력을 보여주며, 트로웰의 경사각에 따라서 로봇의 수렴속력이 거의 선형으로 증가한다는 것을 알 수 있다.

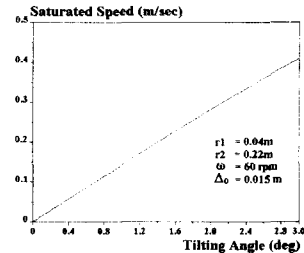


Fig. 12 The saturated speed along the tilting angle

Fig. 13은 본 논문의 미장로봇과 같은 메카니즘으로 구동되는 미장기계의 수렴속력을 수식 (18)에 의한 이론치와 실험결과를 비교해서 표현한 것이다. 그림에서 실선은 트로웰의 경사각이 0° 에서 2° 까지 변화할 때 수식 (18)에 의한 미장기계의 수렴속력을 나타내며, 3개의 점은 트로웰의 경사각이 1°, 1.5°, 2° 일 때 실험에 의한 미장기계의 수렴속력을 나타낸다. 그림에서 두 결과가 거의 일치한다는 것과 수렴속력이 트로웰 경사각에 따라 선형적으로 증가한다는 것을 확인할 수 있다.

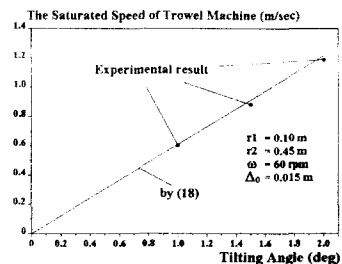


Fig. 13 The saturated speed along the tilting angle of trowel machine

### 5. 회전 운동에서의 로봇의 수렴속도

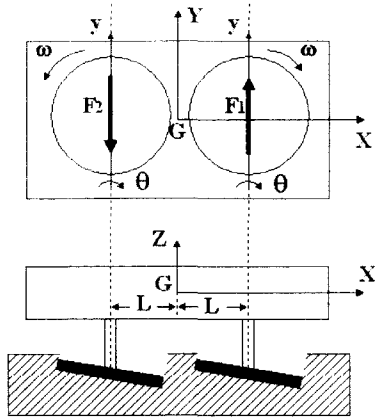


Fig. 14 The top view and the front view of the robot

미장로봇을 회전시키기 위해서는 Fig. 14에서와 같이 서로 같은 방향으로 같은 양  $\theta$  만큼 트로웰을 기울이기만 하면 된다. 두 개의 트로웰이 서로 반대방향으로 회전하기 때문에 미장로봇에는  $F_1$ 과  $F_2$ 의 커플링 힘이 작용한다. 따라서 미장로봇은 반시계 방향으로 회전하게 된다. 앞 장의 직진운동의 경우에서와 마찬가지로, 우리는 로봇의 회전속도가 커지면 커질수록 두 개의 회전트로웰에 의한 가속력이 점점 작아져서, 각각의 트로웰은 결국 수렴속력  $v_s$ 에 도달할 것이라는 것을 예상할 수 있다. 왜냐하면, 마찰력의 항상 속도의 반대 방향으로 작용하기 때문이다. 로봇의 수렴 회전속력은 대략적으로 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\omega_s = \frac{v_s}{L} \tag{19}$$

회전 운동의 수렴속력  $v_s$ 는 직진운동에서의 수렴속력  $v_s$ 과 다른데 그 이유는 식 (8)의 트로웰의 직진 속력  $v_r$ 이 회전의 경우에는 전체 트로웰에서 같지 않기 때문이다. 회전운동에 대한 정확한 수렴속력은 계산하기가 매우 복잡하므로 우리는 직진운동의 수렴속력을 근사화한다.

### 6. 수렴속도를 이용한 미장로봇의 속도제어

두 개의 회전트로웰에서 발생하는 마찰력을 구

동력으로 이용하는 미장로봇은 주어진 트로웰의 경사각에 해당하는 로봇의 수렴속력이 존재하므로, 작업자는 두 개의 트로웰을 기울이는 방향과 경사각을 조절함으로써, Fig. 15와 같은 과정으로 통해 미장로봇의 직진과 회전운동을 제어할 수 있다.

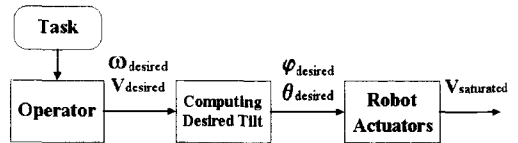


Fig. 15 The new velocity control method of the robot

작업자가 무선 조종기로 미장로봇에 직진속도 명령( $V^{desired}$ )이나 회전속도 명령 ( $\omega^{desired}$ )을 내리면, 로봇의 제어부에서는 먼저 각 트로웰의 마찰구동력을 지령 속도 방향으로 발생시키기 위해 각 트로웰을 기울이는 방향 ( $\phi^{desired}$ )을 계산하고, 그 다음에 식 (17)과 (19)의 관계식으로부터 속도지령에 해당하는 양( $\theta^{desired}$ )만큼 트로웰을 기울인다. 그러면, 로봇의 속도는 트로웰에서 발생하는 가속력으로 인해 점점 증가하다가, 그 크기가 식 (18)의 트로웰의 경사각에 대응되는 로봇의 수렴속력과 같아지면, 그 때부터 더 이상 증가하지 않는다. 결과적으로, 작업자는 트로웰의 자세를 조절함으로써 속도 센서나 가속도 계산 없이 미장로봇의 운동을 제어할 수 있는 것이다.

### 7. 결론

본 논문에서는, 2개의 회전트로웰만으로 구성된 전방향 자기추진 미장로봇의 운동제어를 위해서, 다음과 같은 연구를 수행하였다.

첫째, 미장로봇의 속도제어에 있어서 속도 피드백을 이용한 속도 제어의 문제점을 지적하였다.

둘째, 직진 운동 중인 미장로봇의 트로웰과 바닥사이에서 발생하는 마찰구동력을 구했으며, 이 마찰구동력은 로봇의 직진속력에 비해서 감소하여 트로웰의 경사각에 해당하는 로봇의 수렴속력이 존재함을 보였다. 또한, 마찰구동력의 크기를 결정하는 트로웰의 경사각과 미장로봇의 수렴속력의 관계식을 유도하였다.

셋째, 직진운동에서의 수렴속력을 이용하여 회

전운동에 대한 수렴속력을 근사적으로 유도하였다.

넷째, 미장로봇의 트로웬 경사각에 따른 수렴속도가 존재함을 이용해서, 트로웬의 자세(방향각과 경사각)를 조절함으로써 속도 센서 없이 미장로봇의 운동을 제어할 수 있는 방법을 제시하였다.

### 참고문헌

1. H.G. Lee, "The Trend of Constructional Automation," ICASE Magazine, Vol. 1, No. 2, pp 43-48, 1995.
2. D.H. Shin and H. J. Kim, "Omni-Directional Self-Propulsive Troweling Robot," Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, Vol. 4, pp 3689-3696, 1998.
3. <http://www.tokimec.co.jp/ENGLISH/TECNO/index.html>.
4. T.W. Lambe and R.V. Whiteman, Soil Mechanics, pp 122-125, John Wiley & Sons, Inc, 1969.
5. D.H. Han, "The report on the Accelerometer and Gyros," University of Seoul, 1997.