

미장로봇의 운동해석과 동특성 분석

김진호*, 신동현*

Motion Analysis and Dynamic Characteristics of the Concrete Floor Finishing Robot with Deformable Trowels

Jin Ho Kim*, Dong Hun Shin*

ABSTRACT

Recently, the concrete floor finishing robot, which can be used for flattening and smoothing the concrete floor, has been developed in Korea and Japan. While the previous research assumes that the concrete floor is deformable and the trowel is rigid in modeling the concrete floor finisher, we assume that the concrete floor is rigid and the trowel is deformable. Based on this assumption, we derived the equations of motion and found the convergent velocity of the concrete floor finisher using the computer simulation. From these results, we can understand the relationship between the motion characteristics and the design and control parameter of the robot.

Key Words : Concrete floor finishing robot (콘크리트 바닥 미장로봇), Deformable trowels (변형가능 흙손), Convergent velocity (수렴속도), Motion analysis (운동해석)

1. 서론

Fig. 1 은 건물의 콘크리트 바닥을 평평하고 매끈하게끔 처리하기 위해 사용되는 수동형 미장기계이다. 그런데 이 장비를 이용한 미장작업은 기계 조종의 어려움과 진동 및 그 작업량 때문에 대표적인 3D 업종으로 분류되고 있는 실정이다^[1]. 최근 한국과 일본에서는 이에 대한 개선책으로 콘크리트 바닥 미장로봇을 개발한 바 있다^[2,3]. Fig. 2 는 서울시립대등 한국에서 개발하고 있는 미장로봇으로서 두 개의 미장부를 갖고 있다. 이 미장로봇은 미장부를 기울임으로써, 회전하는 흙손과 바닥면 사이에 발생하는 비대칭적 마찰력을 이용하여 전방향운동을 할 수 있다^[4].



Fig. 1 Conventional concrete floor finisher



Fig. 2 Concrete floor finishing robot

2001년 2월 27일 접수
* 서울시립대학교 공과대학 정밀기계공학과

최근 미장로봇과 관련하여 Shin 과 Kim^[4], Shin 과 Han^[5]의 연구 결과들이 발표된 바 있다. 그들의 연구 결과들은 공통적으로 "흠손은 둥근 원판 형태의 강체이고 미장작업 대상인 콘크리트바닥이 변형한다"는 가정을 기본으로 하고 있다. 그런데 현장에서는 콘크리트 바닥이 거의 굳었을 때 미장작업을 시작하기 때문에 그들의 가정은 실제에 적합하지 않다. 따라서 본 연구에서는 과거 연구와는 반대로 다음과 같은 가정을 바탕으로 한다.

- 가정 1 : 콘크리트 바닥은 강체이다.
- 가정 2 : 미장부는 4 개의 흠손으로 구성되며 각각의 흠손은 탄성변형을 한다.

이를 토대로 본 연구에서는 우선 Fig. 1 과 같이 1 개의 미장부만 갖는 미장기계의 운동해석에 초점을 맞추고, 그 결과를 Fig. 2 와 같은 미장로봇으로 확대 적용할 것이다.

2. 미장기계의 운동모델링

해석의 용이함을 위해 수동형 미장기계의 구조를 Fig. 3 과 같이 단순화시키도록 한다. 즉 콘크리트를 다듬는 미장부와 동력 공급을 담당하는 본체부로 이뤄지고, 이때 미장부는 탄성보로 볼 수 있는 가늘고 긴 4 개의 흠손으로 구성되어 있다고 본다. 미장부는 Y 축에 대해 - θ 만큼 기울어져 있고, 반시계방향으로 ω 의 일정한 각속도로 회전하고 있다. 또한 무게중심은 지면으로부터 h의 높이에 있고, 흠손의 길이는 r이다.

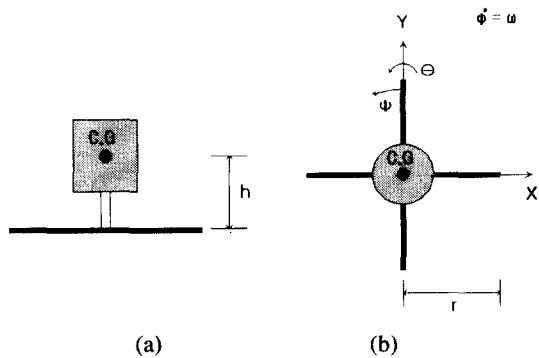


Fig. 3 Simplified concrete floor finisher viewed (a) from the side and (b) from the above

그러면 미장부의 각 흠손은 회전하면서 미장기계의 자중에 의해 탄성변형을 하기 때문에 지면과의 접촉방식(끝단 점접촉 또는 선접촉)이 변한다. 따라서 다음과 같은 과정을 통해 미장기계의 운동방정식을 이끌어 내기로 한다.

- 첫째, 흠손 변형에 따른 지면반력 및 마찰력 분포를 밝힌다.
- 둘째, 적당한 흠손의 변형모델을 선정한다.
- 셋째, 선정된 모델의 운동방정식을 찾는다.

2.1 흠손 변형시 지면반력 및 마찰력 분포

흠손은 회전하면서 Fig. 4 와 같이 지면과 끝단 점접촉 또는 선접촉 과정을 겪는다. 그런데 운동방정식을 구하는데 있어서 Fig. 4(a)의 경우는 상관 없으나 Fig. 4(b)와 같이 선접촉을 하는 경우에는 반력의 분포식을 먼저 알아야 한다.

흠손이 지면과 선접촉하는 경우, 흠손은 지면과 접하여 어떤 변형도 하지 않는 부분과 굽힘변형을 하는 두 부분으로 나누어 생각할 수 있다. 그런데 이들이 탄성론의 Hook 의 법칙과 정적 평형조건을 만족시키려면 Fig. 5 와 같이 지면반력은 두 부분의 경계지점에 집중해야 한다는 결론을 얻는다^[6]. 따라서, 흠손과 지면사이의 반력은 지면과의 접촉방식에 관계없이 항상 집중반력이고, 특히 선접촉일 경우의 반력 작용점은 굽힘변형을 하는 부분과 아무런 변형이 없는 부분의 경계에 작용한다. 이는 결국 마찰력도 이 경계점에 집중함을 의미한다.

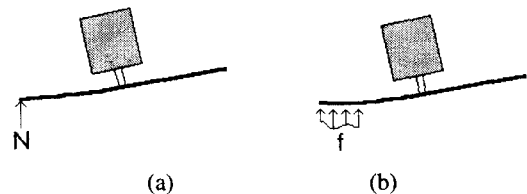


Fig. 4 Reactive force (a) concentrated on the edge of the trowel and (b) distributed on the line-contact area

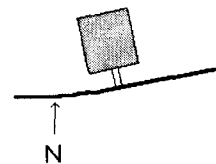


Fig. 5 Reactive force from the concrete floor

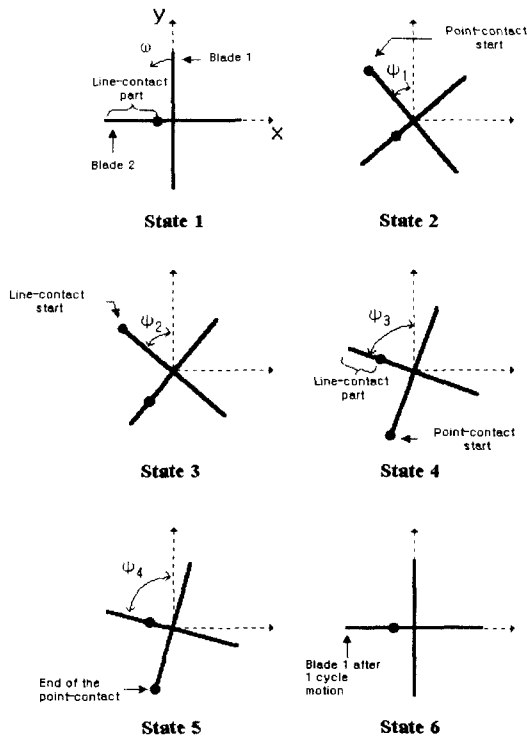
2.2 흡손 변형 모델

흡손은 굽힘강성이 너무 크면 회전하면서 끝단 점접촉만을 하지만 적당한 굽힘강성을 가질 경우에는 점접촉과 선접촉 과정을 모두 겪는다. 본 연구에서는 흡손의 굽힘강성이 충분히 작아서 점접촉과 선접촉 과정을 모두 겪는 경우만을 고려하기로 한다. 이는 흡손이 지면과 선접촉을 해야 콘크리트 바닥을 평평하고 매끄럽게 하는 적당한 미장효과를 얻을 수 있기 때문이다. 이 경우, 미장부의 흡손은 Fig. 6 과 같이 6 개의 상태를 경계로 하는 5 개의 변형구간으로 구분된다. 그림에서 흡손 위의 굽은 점은 지면으로부터 가해지는 반력작용점이자 마찰력 작용점을 나타낸다.

각 구간에서 지면과 흡손의 접촉방식을 정리하면 다음과 같다.

1 구간 (상태1 ~ 상태2, $0 \leq \psi \leq \psi_1$):

1 번 흡손은 지면과 접촉을 안하고, 2 번 흡손은 지면과 선접촉한다.



where the reactive force from the floor is acted on the each point.

Fig. 6 Trowel deformation procedure

2 구간 (상태2 ~ 상태3, $\psi_1 \leq \psi \leq \psi_2$):

1 번 흡손은 지면과 끝단 점접촉을 하고, 2 번 흡손은 지면과 선접촉한다.

3 구간 (상태3 ~ 상태4, $\psi_2 \leq \psi \leq \psi_3$):

1, 2 번 흡손 모두 지면과 선접촉한다.

4 구간 (상태4 ~ 상태5, $\psi_3 \leq \psi \leq \psi_4$):

1 번 흡손은 지면과 선접촉하고, 2 번 흡손은 지면과 끝단 점접촉한다.

5 구간 (상태5 ~ 상태6, $\psi_4 \leq \psi \leq \pi/2$):

1 번 흡손은 지면과 선접촉하고, 2 번 흡손은 지면과 접촉을 안한다.

2.3 미장기계의 운동방정식

이제 앞서 제시한 흡손 변형모델의 각 구간별 운동방정식을 구하기로 하자. 이를 위해 다음과 같은 가정을 한다.

첫째, 미장기계 무게중심의 각속도 $\alpha_x, \alpha_y, \alpha_z$ 가 모두 0 이 되도록 미장기계 조작자가 힘 M_x, M_y, M_z 를 가하고 있다.

둘째, 미장기계의 질량관성모멘트 행렬은 대각행렬이 되도록 제작되었다.

2.3.1 1 구간 (상태 1 ~ 상태 2, $0 \leq \psi \leq \psi_1$)

만일 미장기계의 속도가 $\vec{V} = V_x \hat{i} + V_y \hat{j}$ 라면 2 번 흡손에 가해지는 반력 작용점(Fig. 7 에서 N_2 작용점) 속도는 다음과 같다.

$$\vec{V}_2 = (V_x + k_2 \omega \sin \psi) \hat{i} + (V_y - k_2 \omega \cos \psi) \hat{j} \quad (1)$$

여기서 k_2 는 미장부의 회전중심과 흡손 2 에 가해지는 지면 반력 작용점 사이의 거리이다.

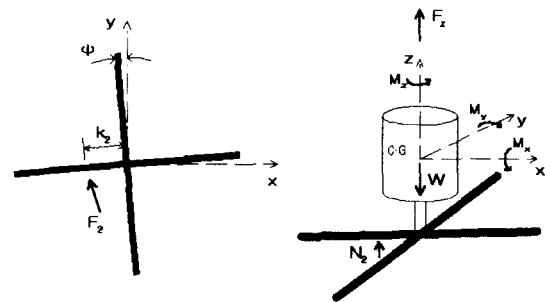


Fig. 7 Free body diagram during the 1st period

식 (1)을 이용해 흠손과 지면사이의 쿨롱마찰력을 구하면

$$F_{2,x} = \frac{-\mu N_2(V_x + k_2\omega \sin\psi)}{\sqrt{V_x^2 + V_y^2 + k_2^2\omega^2 + 2V_x k_2\omega \sin\psi - 2V_y k_2\omega \cos\psi}} \quad (2-a)$$

$$F_{2,y} = \frac{-\mu N_2(V_y - k_2\omega \cos\psi)}{\sqrt{V_x^2 + V_y^2 + k_2^2\omega^2 + 2V_x k_2\omega \sin\psi - 2V_y k_2\omega \cos\psi}} \quad (2-b)$$

이다. 이제 자유물체도인 Fig. 7로부터 운동방정식을 구하면 다음과 같다.

$$ma_x = F_{2,x} \quad (3-a)$$

$$ma_y = F_{2,y} \quad (3-b)$$

$$ma_z = 0 = N_2 - W + F_z \quad (3-c)$$

$$I_x \alpha_x = 0 = M_x - N_2 k_2 \sin\psi + F_{2,y} h \quad (3-d)$$

$$I_y \alpha_y = 0 = M_y + N_2 k_2 \cos\psi - F_{2,x} h \quad (3-e)$$

$$I_z \alpha_z = 0 = M_z + F_{2,x} k_2 \sin\psi - F_{2,y} k_2 \cos\psi \quad (3-f)$$

해를 구하려면 추가적인 식이 더 필요한데, 이는 보의 처짐이론을 통해 반력 N_2 와 흠손 변형간의 관계로부터 다음과 같이 구할 수 있다 [7].

$$\theta \cos\psi = \frac{N_2 k_2^2}{2EI} \quad (4-a)$$

$$r\theta \sin\psi_1 = \frac{N_2 k_2^3}{6EI} \quad (4-b)$$

2.3.2.2 구간 (상태 2 ~ 상태 3, $\psi_1 \leq \psi \leq \psi_2$)

1 구간과 마찬가지로, 1, 2 번 흠손의 반력 작용점(Fig. 8 에서 N_1, N_2 작용점) 속도를 이용해 다음과 같은 쿨롱마찰력을 구할 수 있다.

$$F_{1,x} = \frac{-\mu N_1(V_x - r\omega \cos\psi)}{\sqrt{V_x^2 + V_y^2 + r^2\omega^2 - 2V_x r\omega \cos\psi - 2V_y r\omega \sin\psi}} \quad (5-a)$$

$$F_{1,y} = \frac{-\mu N_1(V_y - r\omega \sin\psi)}{\sqrt{V_x^2 + V_y^2 + r^2\omega^2 - 2V_x r\omega \cos\psi - 2V_y r\omega \sin\psi}} \quad (5-b)$$

$$F_{2,x} = \frac{-\mu N_2(V_x + k_2\omega \sin\psi)}{\sqrt{V_x^2 + V_y^2 + k_2^2\omega^2 + 2V_x k_2\omega \sin\psi - 2V_y k_2\omega \cos\psi}} \quad (5-c)$$

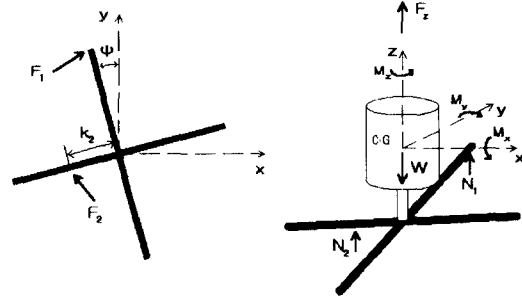


Fig. 8 Free body diagram during the 2nd period

$$F_{2,y} = \frac{-\mu N_2(V_y - k_2\omega \cos\psi)}{\sqrt{V_x^2 + V_y^2 + k_2^2\omega^2 + 2V_x k_2\omega \sin\psi - 2V_y k_2\omega \cos\psi}} \quad (5-d)$$

Fig. 8로부터 2 구간에서의 운동방정식을 구하면 다음과 같다.

$$ma_x = F_{1,x} + F_{2,x} \quad (6-a)$$

$$ma_y = F_{1,y} + F_{2,y} \quad (6-b)$$

$$ma_z = 0 = N_1 + N_2 - W + F_z \quad (6-c)$$

$$I_x \alpha_x = 0 = M_x + N_1 r \cos\psi - N_2 k_2 \sin\psi + F_{1,y} h + F_{2,y} h \quad (6-d)$$

$$I_y \alpha_y = 0 = M_y + N_1 r \sin\psi + N_2 k_2 \cos\psi - F_{1,x} h - F_{2,x} h \quad (6-e)$$

$$I_z \alpha_z = 0 = M_z - F_{1,x} r \cos\psi + F_{2,x} k_2 \sin\psi - F_{1,y} r \sin\psi - F_{2,y} k_2 \cos\psi \quad (6-f)$$

흠손의 변형을 고려한 추가적인 관계식은 다음과 같이 구할 수 있다 [7].

$$r\theta \sin\psi_1 \approx r\theta \sin\psi - \frac{N_1 r^3}{3EI} \quad (7-a)$$

$$\theta \cos\psi = \frac{N_2 k_2^2}{2EI} \quad (7-b)$$

$$r\theta \sin\psi_1 = \frac{N_2 k_2^3}{6EI} \quad (7-c)$$

2.3.3.3 구간 (상태 3 ~ 상태 4, $\psi_2 \leq \psi \leq \psi_3$)

3 구간에서 흠손에 작용하는 쿨롱마찰력도 1, 2 구간과 마찬가지로 1, 2 번 흠손의 반력 작용점(Fig. 9 에서 N_1, N_2 작용점) 속도를 이용해 다음과 같이 구할 수 있다.

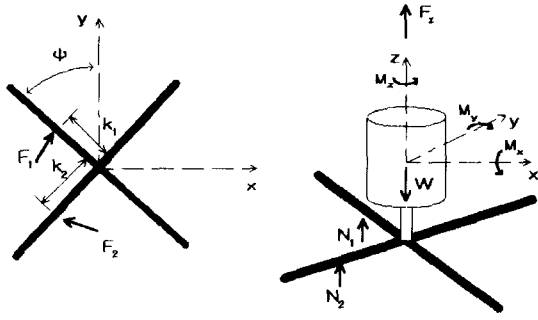


Fig. 9 Free body diagram during the 3rd period

$$F_{1,x} = \frac{-\mu N_1(V_x - k_1\omega \cos \psi)}{\sqrt{V_x^2 + V_y^2 + k_1^2\omega^2 - 2V_x k_1\omega \cos \psi - 2V_y k_1\omega \sin \psi}} \quad (8-a)$$

$$F_{1,y} = \frac{-\mu N_1(V_y - k_1\omega \sin \psi)}{\sqrt{V_x^2 + V_y^2 + k_1^2\omega^2 - 2V_x k_1\omega \cos \psi - 2V_y k_1\omega \sin \psi}} \quad (8-b)$$

$$F_{2,x} = \frac{-\mu N_2(V_x + k_2\omega \sin \psi)}{\sqrt{V_x^2 + V_y^2 + k_2^2\omega^2 + 2V_x k_2\omega \sin \psi - 2V_y k_2\omega \cos \psi}} \quad (8-c)$$

$$F_{2,y} = \frac{-\mu N_2(V_y - k_2\omega \cos \psi)}{\sqrt{V_x^2 + V_y^2 + k_2^2\omega^2 + 2V_x k_2\omega \sin \psi - 2V_y k_2\omega \cos \psi}} \quad (8-d)$$

여기서 k_1 은 미장부 회전중심과 흡손 1 에 가해지는 지면반력 작용점 사이의 거리이다. Fig. 9 로부터 3 구간에서의 운동방정식은 다음과 같다.

$$ma_x = F_{1,x} + F_{2,x} \quad (9-a)$$

$$ma_y = F_{1,y} + F_{2,y} \quad (9-b)$$

$$ma_z = 0 = N_1 + N_2 - W + F_z \quad (9-c)$$

$$I_x \alpha_x = 0 = M_x + N_1 k_1 \cos \psi - N_2 k_2 \sin \psi + F_{1,y} h + F_{2,y} h \quad (9-d)$$

$$I_y \alpha_y = 0 = M_y + N_1 k_1 \sin \psi + N_2 k_2 \cos \psi - F_{1,x} h - F_{2,x} h \quad (9-e)$$

$$I_z \alpha_z = 0 = M_z - F_{1,x} k_1 \cos \psi + F_{2,x} k_2 \sin \psi - F_{1,y} k_1 \sin \psi - F_{2,y} k_2 \cos \psi \quad (9-f)$$

흡손의 변형에 따른 관계식은 다음과 같이 구해진다 [7].

$$\theta \sin \psi = \frac{N_1 k_1^2}{2EI} \quad (10-a)$$

$$\theta \cos \psi = \frac{N_2 k_2^2}{2EI} \quad (10-b)$$

$$r\theta \sin \psi_1 = \frac{N_1 k_1^3}{6EI} \quad (10-c)$$

$$r\theta \sin \psi_1 = \frac{N_2 k_2^3}{6EI} \quad (10-d)$$

2.3.4.4 구간 (상태 4 ~ 상태 5, $\psi_3 \leq \psi \leq \psi_4$)

4 구간에서 흡손은 2 구간과 대칭적인 과정으로 변형한다.

2.3.5.5 구간 (상태 5 ~ 상태 6, $\psi_4 \leq \psi \leq \pi/2$)

5 구간에서 흡손은 1 구간과 대칭적인 과정으로 변형한다.

2.4 각 변형구간의 경계값

이제 5 개 구간을 구분했던 경계 각도인 $\psi_1, \psi_2, \psi_3, \psi_4$ 들을 구하면 모든 구간에 대해 연속적인 해를 얻을 수 있다.

미장기계는 이동하며 z 축에 대해 병진 진동을 하지만 F_z 의 적분값은 항상 0 이어야 한다. 그렇지 않으면 미장기계는 결국 공중으로 부상하거나 땅속으로 침강하는 형태로 운동하기 때문이다. 이 조건으로 ψ_1 은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\psi_1 = \sin^{-1} \left(\sqrt{\frac{EI\theta(2+\sqrt{2})}{18Wr^2}} \right) \quad (11-a)$$

ψ_2 는 구간 2,3 의 경계이므로, 경계조건으로서 $\psi=\psi_2$ 일때 두 구간에서 얻은 N_1, N_2, k_2 는 같고 $k_1=r$ 이어야 한다. 이로부터 ψ_2 는 다음과 같다.

$$\psi_2 = \sin^{-1} \left(\sqrt{\frac{EI\theta(2+\sqrt{2})}{2Wr^2}} \right) \quad (11-b)$$

ψ_3 은 구간 3,4 의 경계이므로, 경계조건으로서 $\psi=\psi_3$ 일때 두 구간에서 구한 N_1, N_2, k_1 은 같고 $k_2=r$ 이어야 한다. 이로부터 ψ_3 는 다음과 같다.

$$\psi_3 = \cos^{-1} \left(\sqrt{\frac{EI\theta(2+\sqrt{2})}{2Wr^2}} \right) \quad (11-c)$$

ψ_4 는 구간 4,5 의 경계로서 2 번 흡손이 지면과의 접촉을 끝내는 순간이므로, $\psi=\psi_4$ 일때 4 구간식

의 N_2 는 0 이어야 한다. 이로부터 ψ_4 는 다음과 같다.

$$\psi_4 = \cos^{-1}\left(\sqrt{\frac{EI\theta(2+\sqrt{2})}{18Wr^2}}\right) \quad (11-d)$$

3. 컴퓨터 시뮬레이션을 통한 미장기계의 동특성 분석

2 장에서 구한 식들은 비선형 연립 미분방정식이므로 해석적인 방법으로는 미장기계의 동특성 분석이 불가능하다. 그러므로 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 그의 동적응답 및 특성들을 살펴보기로 한다. 이때, 미장기계의 특성치들은 Table 1 과 같이 주어진다 고 하자.

미장부가 180 도 회전하는 동안, 미장기계의 변위 및 속도응답은 각각 Fig. 10, 11 과 같다. 그림에서 알 수 있듯이, 미장기계는 X 방향에 대해서는 좌우로 진동하면서 한쪽 방향으로 계속 흐르는 경향을 보이고 있으며, Y 방향에 대해서는 초기 가속되다가 어느 시점에 일정 속도로 수렴하고 있다. 이는 미장기계의 특성치를 변화시켜도 보여주는 동일한 특징이다. 그런데, 미장기계의 Y 방향에 대한 속도가 일정값으로 수렴했다는 의미는, 5 개 구간 모두에서 Y 방향에 대한 가속도가 0 임을 의미한다. 따라서 식 (3-b)에서 $a_y=0$ 을 만족시키는 속도 V_y 를 미장기계의 수렴속도로 봐도 상관없다. 이로부터 수렴속도 $V_{y,c}$ 는 다음과 같다.

$$V_{y,c} = \omega \sqrt{\frac{EI\theta(2+\sqrt{2})}{2W}} \quad (12)$$

Table 1 Property of the concrete floor finisher

Parameter	Value
Weight (W)	400 [N]
Height of the CG (h)	0.3 [m]
Length of the trowel (r)	0.3 [m]
Friction coefficient (μ)	0.7
Angular velocity (ω)	2π [rad/sec]
Moment of inertia of cross sectional area (I)	$1.8E-10$ [m^4]
Elasticity of the trowel (E)	$200E9$ [N/m^2]
Trowel tilting angle (θ)	2 [degree]

식 (12)는 미장기계의 제어/설계 변수에 따른 동특성을 보여주는 중요한 식이다. 이 식을 통해 다음과 같은 사실을 알 수 있다.

첫째, 미장기계의 수렴속도는 제어변수에 해당하는 ω , θ 에 대해 다음과 같은 관계를 갖는다.

$$V_{y,c} \propto \omega \sqrt{\theta} \quad (13)$$

둘째, 미장기계를 설계할 때 흙손의 굽힘강성 (EI)과 몸체 무게(W)를 적당히 조율해야 한다. 만일 굽힘강성이 몸체무게에 비해 너무 크다면 제어변수인 흙손 기울임각(θ)의 미세한 변화에도 큰 수렴속도를 가질 수 있어서 제어하기가 어려워질 수 있다.

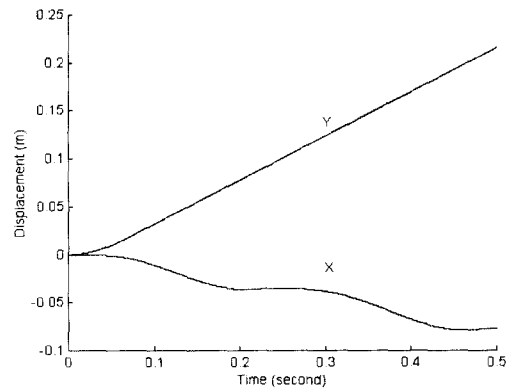


Fig. 10 Position change during the 2 cycles

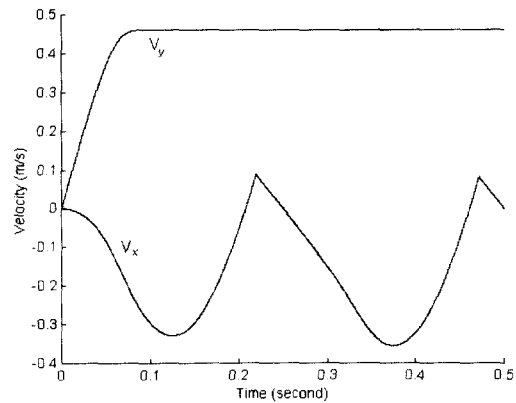


Fig. 11 Velocity change during the 2 cycles

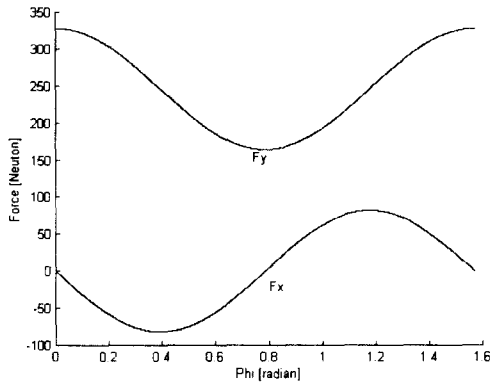


Fig. 12 Initial friction force .

한편 본 연구에서 구한 운동방정식은 Shin 과 Kim^[4], Shin 과 Han^[5]의 연구결과와 다소 차이점을 보여준다. Shin 과 Kim^[4]은, 흙손이 초기 정지상태에서 회전을 시작하는 순간 지면에서 발생하는 마찰력은 X 방향에 대해서는 항상 0 이고 Y 방향에 대해서는 일정값을 갖는다고 하였다. 반면, 본 연구에서는 Fig. 12 와 같이 순간 마찰 구동력이 미장부가 회전을 시작하는 위치 ψ 에 따라 다르게 나타났다.

또한, Shin 과 Han^[5]은 미장로봇의 동적 거동에 대한 연구를 통해 다음과 같은 수렴속도와 제어변수간의 관계식을 유도했다.

$$V_{y,c} \propto \omega\theta \tag{14}$$

이 식은 식 (13)과 비교해 볼 때, θ 와의 관계에 있어서 큰 차이점을 보이고 있다. 특히 본 논문의 결과에서는 미장기계가 X 방향에 대하여 좌우운동을 하는 것으로 나타났으나, 그들의 연구에서는 X 방향에 대해 전혀 운동을 하지 않는다고 하여 또 다른 차이점을 보이고 있다.

4. 미장로봇으로의 적용

실제 콘크리트 바닥 미장로봇은 Fig. 13 처럼 2 개의 미장부로 구성된다. 흙손은 ω 라는 동일한 각속력으로 서로 반대방향으로 회전하고 있으며, 만일 Y 방향으로 병진운동을 하도록 하려면, 두 개의 흙손을 θ 만큼 서로 반대방향으로 기울여야 한

다.

미장기계의 운동해석 방법을 미장로봇에 적용해 보자. 미장로봇의 경우, 조작자가 모멘트를 가하지 않으므로, X 축에 대해 회전진동을 하면서 Y 축 방향으로 병진운동을 하는 형태이다. 그러나 이러한 X 축의 회전진동은 Y 축 방향에 대한 병진운동에 큰 영향을 주지 않으므로 3 장에서 구한 식 (12), (13)은 미장로봇에도 유효하다.

Fig. 14 는 미장로봇과 동일한 원리로 구동되는 반자동 미장기계의 실험결과이다. 그림에서 실선은 식 (13)에 의한 이론적인 결과이고 점으로 표시된 것은 실험에 의한 결과이다. 이때, 이론 결과인 실선은 장비의 특성상 흙손의 굽힘강성 및 무게를 제대로 측정할 수 없는 관계로 편차를 최소로 하는 비례상수를 적용하여 얻은 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 실험값이 이론값의 경향을 근사적으로 따르고 있다.

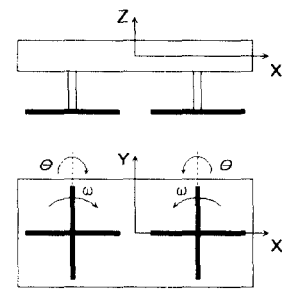


Fig. 13 Concrete floor finishing robot

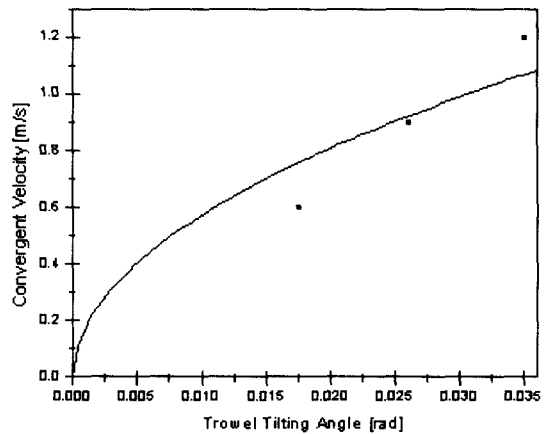


Fig. 14 Convergent velocity along the tilting angle of the trowel

5. 결론

본 연구에서는 미장로봇의 운동해석에 있어서 좀 더 현실적인 가정 - 즉 "콘크리트 바닥은 강체이고, 미장부는 4 개의 흙손으로 구성되며 각각의 흙손은 탄성변형을 한다." - 을 토대로 다음과 같은 연구를 수행했다.

첫째, 적당한 흙손의 변형모델을 선택하여, 이를 기초로 미장기계의 동력학 및 흙손의 변형에 따른 기하학을 분석함으로써 운동방정식을 구했다.

둘째, 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 Y 방향에 대해 수렴속도가 존재함을 확인하였고, 수렴속도식을 구해 흙손의 굽힘강성과 미장기계 몸체의 무게가 주요 설계 변수임을 알았다.

셋째, 본 연구 결과를 과거 연구결과와 비교하여 그 타당성을 확인하였다.

넷째, 미장기계의 분석결과를 미장로봇으로 확장하였다.

참고문헌

1. 이호길, "건설 자동화의 경향," 제어·자동화·시스템공학회지, 제 1 권, 제 2 호, pp. 43-48, 1995.
2. 한국생산기술연구원, 서울시립대학교, "고기능 콘크리트 바닥 미장로봇의 개발," 건설교통부 연구개발사업 최종보고서, 1998.
3. <http://www.tokimec.co.jp/ENGLISH/TECNO/index.html>
4. Shin, D. H. and Kim, H. J., "Omni-Directional Self-Propulsive Troweling Robot," *Proceedings of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, Vol. 4, pp. 3689-3696, 1998.
5. 신동현, 한두호, "미장로봇의 운동제어," 한국정밀공학회지, 제 16 권, 제 8 호, pp. 38-45, 1999.
6. Kim, J. H., Shin, D. H., "Motion Modeling of Rotary Trowel Machine," *Journal of the Institute of Industrial Technology*, Vol. 7, pp. 81-93, 1999.
7. Timoshenko, S. P. and Goodier, J. N., *Theory of Elasticity*, McGraw-Hill, 1994.
8. Furiya, H. and Kiyohiro, N., "Floor polishing robot driven by self-propulsive force," *JRSJ*, Vol. 13, No. 16, pp. 120-125, 1995.
9. Shin, D. H. and Kim, H. J., "Self-propulsive Floor Polishing Robot," *Proceedings of the IASTED International Conference Applied Modeling and Simulation '97*, pp. 284-290, 1997.