

로봇 착유시스템을 위한 매니플레이터 설계

Design of a Manipulator for Robot Milking System

김 옹*	민병로*	이대원*	정문영**
정회원	정회원	정회원	
W. Kim	B. R. Min	D. W. Lee	M. Y. Jung

1. 서론

유럽의 선진낙농국을 중심으로 낙농에서 가장 노동강도가 높은 착유작업을 기계화하기 위하여 노력하고 있으며, 개발 보급 중인 로봇 착유시스템의 매니플레이터는 여러 가지 형태를 가지고 개발되고 있다⁽¹⁾⁽³⁾⁽⁴⁾⁽⁵⁾. 국내에서도 로봇 착유시스템의 개발을 위하여 직교좌표형태를 가진 매니플레이터의 연구를 수행하였다⁽²⁾.

로봇 착유시스템은 착유컵 등 여러 가지 작업기를 젖소의 유방으로 이동시켜주는 매니플레이터가 필수적이며, 본 연구에서는 로봇 착유시스템을 위한 다관절 매니플레이터를 개발하기 위하여 설계된 매니플레이터의 각 관절에서 필요한 소요 동력을 구하고 구동을 위한 모터를 선정하고자 한다.

2. 재료 및 방법

매니플레이터는 5자유도를 가진 수직 다관절 매니플레이터이로 구동을 위한 모터는 서보모터를 사용하였다. 서보 모터는 각 축에 걸리는 부하와 가·감속 토크, 실효토크를 구함으로써 선정하게 된다.

가. 설계부하(W_d) 및 모터 회전수(N_m)

설계된 도면을 이용하여 각 축의 자중(w)을 구하고, 이를 기초로 각 축의 모터에 걸리는 부하(W)로부터 설계부하(W_d)를 구하기 위하여 안전계수를 고려하였다. 설계부하를 구하기 위한 식은 식-1과 같다. 여기서, W_{di} 는 설계부하(N), W_i 는 각 축의 자중(N), f_s 는 안전계수를 나타내며, 1.5를 적용하였다.

$$W_{di} = \sum W_i \times f_s \tag{식-1}$$

적정 모터 회전수를 알아보기 위하여 각 축의 감속기와 부하속도를 고려하여 산출하기 위한 식은 식-2, 식-3과 같다. 여기서, V_{max} 는 부하속도(20m/min), S 는 1회전 당 이송거리(0.005m/r), u_{max} 는 부하속도(π rad/min), R 는 감속비를 나타낸 것이다.

· 1번 축(직선운동) $N_m = V_{max} / S \times 10^3$ 식-2

· 2~5번 축(회전운동) $N_m = u_{max} \times R$ 식-3

* 성균관대학교 생명공학부 바이오메카트로닉스학과

** 신진테크

나. 각 축의 부하토크(T_L) 및 관성모멘트(I)

각 축에 작용하는 부하토크는 식-4, 식-5에 의해 구할 수 있다. 여기서, T_L 는 부하토크 ($N \cdot cm$), W_{di} 는 각 축에 대한 설계부하(N), l_i 는 기준점으로부터 거리(cm), η 는 감속기 효율(스크류-0.8, 워기어-0.6), R 는 회전속도(rpm)를 나타낸다.

$$\cdot \text{1번 축(직선운동)} \quad T_L = \frac{W_{di} l_i}{20 \pi \eta} \quad \text{식-4}$$

$$\cdot \text{2~5번 축(회전운동)} \quad T_L = \frac{\sum(W_i l_i)}{R \eta} \quad \text{식-5}$$

관성모멘트는 물체를 회전시키거나 회전을 정지시키는데 있어서의 어려움을 나타내는 양으로 그 물체의 질량과 회전축에서 물체의 무게중심까지 거리의 자승과의 곱으로 나타낼 수 있다.

관성모멘트를 이용함에 있어 모터의 동특성을 나타내는 공업용 단위로 GD^2 을 사용하게 되는데 관성모멘트 I와 GD^2 과의 관계는 식-6과 같이 쓸 수 있다. 여기서, I 는 관성모멘트 ($N \cdot cm \cdot s^2$), G 는 물체의 중량(N), g 는 중력가속도(m/s^2), D 는 물체의 회전반경(m)을 나타낸다.

$$I = \frac{GD^2}{4 \cdot g} \quad \text{식-6}$$

여기서, 각 물체의 형태에 따라 GD^2 은 다르며, 원통형 회전운동은 $\frac{wD^2}{2}$, 벨트형 회전운동은 $w d^2$, 스크류형 직선운동은 $w(\frac{L}{\pi})^2$ 로 쓸 수 있다.

위에서 제시한 GD^2 과 관성모멘트 I를 이용하여 모터축에 대한 모터축 환산 부하관성모멘트(I_M)을 구해야 한다. 모터축 환산 부하관성모멘트는 회전하는 로터(Rotor)에 직접 연결되는 풀리나 키플링과 감속기에 의해 연결되는 것을 모두 고려하여 구해야 한다. 모터축 환산 부하관성모멘트의 형태별 식은 다음과 같다(식-7,식-8).

$$\cdot \text{벨트연결(직선운동)} \quad I_M = I_P + \frac{I_L + I_B + I_R}{R^2} \quad \text{식-7}$$

$$\cdot \text{회전운동} \quad I_M = I_Q + \frac{I_L + I_Q}{R^2} \quad \text{식-8}$$

다. 모터 가선편

모터선정에 있어 모터의 로터에 의한 관성모멘트(I_{MA})를 구하기 위하여 위에서 구한 부하토크와 모터축 환산 부하관성모멘트, 모터 회전속도를 고려하여 모터를 가선편하게 된다.

모터 가선편 조건은 1. 모터 정격 토크(T_r) \geq 부하토크, 2. 모터 로터 관성모멘트(R_i) \geq 모터축 환산 부하관성모멘트/10, 3. 정격 회전수 \geq 모터 회전속도(단, 4시간 연속 구동이 아니면 매뉴얼 상 최대회전수보다 작으면 만족)이다.

라. 가·감속 토크(T_a, T_d) 및 실효 토크(T_{rms})

가·감속 토크를 구하기 위하여 시스템의 속도선도를 작성해야하며, 각 축의 작동을 위한 속도선도는 다음과 같이 설정하였다.

매니플레이터의 상하 직선운동을 하는 1번 축에 대한 속도선도는 그림 1과 같다. 상하 직선운동을 하기 위하여 최대속도를 0.3 m/sec, 가속시간(t_a) 0.2 초, 등속시간(t_c) 0.4 초, 감속시간(t_d) 0.2 초, 정지시간(t_b) 0.2 초로 하여 1 사이클 시간(t_f)을 1 초로 설정하였다.

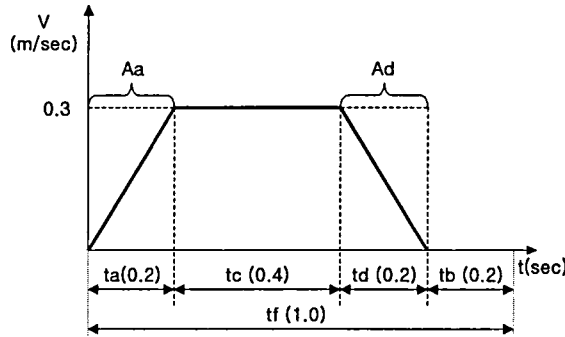


Fig. 1 Velocity profile of the 1st axis.

매니플레이터의 2번 축에서 5번 축까지는 회전운동을 하도록 설계하였으며, 시간에 따른 각속도를 설정해야한다. 평면운동을 위하여 회전하는 2번 축에서 5번 축은 그림 2와 같이 최대속도를 π rad/sec, 가속시간(t_a) 0.2 초, 등속시간(t_c) 0.4 초, 감속시간(t_d) 0.2 초, 정지시간(t_b) 0.2 초로 하여 1 사이클 시간(t_f)을 1 초로 설정하였다.

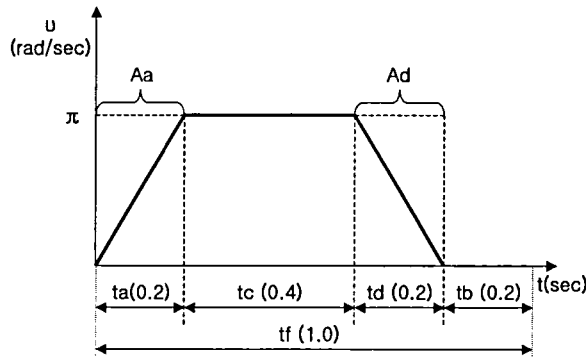


Fig. 2 Velocity profile of the 2nd to the 5th axis.

속도선도에 의해 모터의 가·감속 토크를 구하며, 이때 모터축 환산 부하관성모멘트와 가선정에 의해 결정된 로터관성모멘트를 사용한다. 가속 및 감속 토크는 식-9에 의해 구할 수 있다. 여기서, T_a 는 가속 토크($N \cdot cm$), T_d 는 감속 토크($N \cdot cm$), a 는 가속도(cm/s^2), N 는 회전수(rpm), t_a 는 가속 시간(sec), t_d 는 감속 시간(sec)을 나타낸다.

$$T_a = (I_M + I_{MA}) \cdot \frac{2\pi N}{60 t_a} \quad T_b = -(I_M + I_{MA}) \cdot \frac{2\pi N}{60 t_d} \quad \text{식-9}$$

위에서 구한 가·감속 토크를 이용하여 실효토크를 구하는 식은 식-10과 같다.

$$T_{rms} = \left\{ \frac{(T_a^2 t_a) + (T_c^2 t_c) + (T_d^2 t_d)}{t_f} \right\}^{1/2} (N \cdot cm \cdot s^2) \quad \text{식-11}$$

마. 모터 최종 선정

가·감속 토크 및 실효토크를 가지고 가선택된 모터의 적합성을 판단한 후 최종 모터선정을 하게 되며, 이를 위한 조건은 1. 모터 순간 최대 토크 ≥ 가속토크, 감속토크 중 큰 값, 2. 모터 정격 토크 ≥ 실효 토크, 3. 정격 회전수 ≥ 모터 회전속도(단, 4시간 연속 구동이 아닌 매뉴얼 상 최대회전수보다 작으면 만족)이며, 이를 모두 만족해야 한다.

3. 결과 및 고찰

가. 자중, 기어비, 구동속도 에 의한 모터 회전속도

자중, 기어비 및 구동속도를 고려한 모터 회전속도를 구한 결과는 표 1과 같이 나타났다.

Table 1 Self-weight(w), gear ratio, maximum speed and RPM of each motor.

Axis \ Parameter	w(kg)	R	$V_{max}(m/min)$ or $v_{max}(rad/min)$	RPM
1	34	1 : 1	20	4000
2	15	100 : 1	π	3000
3	10	90 : 1	π	2700
4	4	50 : 1	π	1500
5	7	70 : 1	π	2100

나. 각 축의 부하토크(T_L) 및 관성모멘트(I)

각 축에 걸리는 토크와 관성모멘트를 구한 결과는 표 2와 같다.

Table 2 Load torque(T_L), moment of inertia(I) and moment of inertia by load of rotor (I_M) of axes.

Axis \ Parameter	$T_L (N \cdot cm)$	I ($N \cdot cm \cdot s^2$)	$I_M (N \cdot cm \cdot s^2)$
1	17.2024	0.002973	0.003715
2	35.25	592.776	0.014524
3	53.75	217.737	0.027335
4	87.75	35.9	0.059855
5	0.159155	17.7372	0.002973

다. 모터 가선택, 가·감속 토크(T_a, T_d) 및 실효 토크(T_{rms})

각 축의 부하토크와 관성모멘트를 구한 후 모터 로터에 의한 관성모멘트를 구하고 모터를 가선택하였다. 또한 각 축의 가·감속에 의한 토크를 구하여 실제 축에 걸리는 토크를 구하였으며 결과는 표 3, 표 4와 같다.

Table 3 Acceleration torque(T_a), deceleration torque(T_d) and actual efficiency torque(T_{rms}) of axes.

Axis	Model	$T_a (N \cdot cm)$	$T_d (N \cdot cm)$	$T_{rms} (N \cdot cm \cdot s^2)$
1	CSMD-08B	24.45398	-17.2024	17.23813
2	CSMD-08B	48.91907	-35.25	34.98789
3	CSMD-15B	108.5103	-53.75	63.94009
4	CSMD-20B	206.1173	-87.75	114.5291
5	CSMS-04A	7.160716	-0.15916	3.204742

Table 4 Specification of servo motors.

Axis \ Type	Model No.	Rated Output (W)	Rated Rev. (rpm)	Const. Torque (N · cm)
1	CSMZ-04B	400	3000	13
2	CSMD-20B	2	2000	243
3	CSMD-15B	1.5	2000	73
4	CSMD-08B	0.75	2000	36.4
5	CSMD-08B	0.75	2000	36.4

위 결과를 이용하여 선정된 모터를 이용하여 로봇 착유시스템에 적용하여 매니플레이터를 제작하였다.

4. 요약 및 결론

로봇 착유시스템은 착유컵 등 여러 작업기를 젖소의 유방으로 이동시켜주는 매니플레이터가 필수적이며, 본 연구에서는 로봇 착유시스템을 위한 다관절 매니플레이터를 개발하기 위하여 설계된 매니플레이터의 각 관절에서 필요한 소요 동력을 구하고 구동을 위한 모터를 선정하고자 하였다.

매니플레이터는 5자유도를 가진 수직 다관절 매니플레이터이로 구동을 위한 모터는 서보 모터를 사용하였다. 서보 모터의 선정은 자중과, 기어비, 구동 속도를 이용하여 각 축에 걸리는 부하와 가·감속 토크, 실효토크를 계산하여 구하였으며, 선정된 모터를 이용하여 로봇 착유시스템에 적용하여 매니플레이터를 제작하였다.

5. 참고 문헌

1. Frpst, A. R., t. t. Mottram, M. J. Street, R. C. Hall, D. S. Spencer and C. J. Allen. 2002, "A Field Trial of a Teatcup Attachment Robot for an Automatic Milking System", J. of agriculture Engineering Research, pp. 325~334.
2. Lee, d. w., W. Kim, H. T. Kim. D. W. Kim, D. Y. Choi. J. D. Han. D. J. Kwon and S. K. Lee, 2001, "A Robotic Milking Manipulator for Teat-cup Attachment Modules", J. of Bio-systems Engineering, Vol. 26, No. 2, pp. 163~168.(In korea)
3. Lee, S. H., K. J. Choi, and B. K. Yu, 1998, "Research Trends and Their Perspectives in Milking Robot", J. of Bio-systems Engineering, Vol. 23, No. 6, pp. 641~647.(In korea)
4. Rossing, W. and P. H. Hogewerf, 1997, "State of The Art of Automatic Milking Systems", J. of Computers and Electronics in Agriculture. Vol. 17, No. 1, pp. 1~17
5. 新出 陽三, 松田 從三, 1994, 搾乳ロボットと酪農, 酪農綜合研究所. 北海道