트랙터 부착용 로더의 기구학적 시뮬레이션 프로그램 개발

Kinematic Simulation of Loader Mechanism Mounted on Tractor

이규승* 김준호** 노광모*** 박원엽*
정회원 정회원 정회원 정회원
K.S.Lee J.H.Kim K.M.Noh W.Y.Park

1. 서론

트랙터는 정부의 농가 대외 경쟁력 확보를 위한 농업기계 지원정책에 힘입어 농가에 대한 보급이 증가되고 있으며 다양한 용도와 고효율성 등으로 인해 농가의 의존도가 점차 높아지고 있는 대표적인 농업기계 중의 하나로서 부착 작업기 또한 다양해지고 있다.

최근 농촌지역에서는 로외에서의 운반작업과 평탄작업등에 널리 사용되고 있는 트랙터 부착용 로더의 이용이 크게 증가되고 있으나 현재 농촌지역에 보급되고 있는 대부분의 트랙터 부착용 로더 기구는 트랙터 생산업체로 부터 공급된 것이 아니라 로더의 전문 생산업체로 부터 생산되고 있기 때문에 농민들이 소유하고 있는 다양한 트랙터에 부착할 수 있도록 로더의 규격과 부착부위를 다양화시킬 필요성이 있다. 이러한 다양화 작업은 대부분 수작업에 의한 설계변경과 시행착오법에 의해 수행되어져 왔으나 이러한 방법은 많은 시간이 소요될 뿐 아니라 정확도가 떨어지는 문제점이 지적되고 있다.

특히 버킷의 토양운반작업이 완벽하기 위해서는 버킷의 궤적에 따른 버킷의 자세가 완벽해야 한다. 그러나 궤적에 따라 버킷의 자세가 완벽치 않아 작업중 토양이 쏟아진다든가 하는 문제점이 종종 지적되고 있다. 이러한 문제점은 작업기구부의 기구학적 분석과 이에 따른 설계변경에 의해 개선될 수 있다.

따라서 본 연구의 목적은 이러한 문제점들을 좀더 빠르고 정확하게 해결하기 위해 링크들의 길이와 각도 등의 변화에 따른 기구부의 변위·속도·가속도의 관계를 CAE(Computer-Aided Engineering) 기법을 응용하여 시뮬레이션 하는 프로그램을 제작하고 이를 트랙터 부착용 로더 기구부의 설계개선에 이용하는데 있으며 구체적인 연구의 내용과 목적은 다음과 같다.

1. 로더 기구부를 정의하는 자료들로부터 로더 기구부의 운동방정식을 구하고,
2. 생성된 기구부 운동방정식의 해를 계산하여,
3. 기구학적 결과를 설계자와 교류할 수 있도록 컴퓨터 그래픽을 제공한다.

2. 재료 및 방법

가. 실험용 로더 및 트랙터

트랙터 부착용 로더 기구부의 운동을 분석하기 본 연구에 사용된 트랙터는 L社의 39마력 트랙터를 이용하였으며, 로더는 현재 국내에서 가장 많이 이용되고 있는 S社의 로더이다.

* 성균관대학교 생물기전공학과
** 한국가스공사 연구개발원
*** 건국대학교 농업기계공학과

나. 모델의 검증방법

시뮬레이션 모델에 의한 기구학적 분석방법이 합당한가는 상용의 CAD 프로그램을 이용하여 검증하였다.

3. 시뮬레이션 프로그램 개발

본 연구에서는 로더 기구부를 분석하기 위해 그림 1과 같이 2차원상의 고정링크 1개와 운동링크 6개를 가진 단순한 형상으로 가정하였고 Borland社의 C-언어를 사용하였다. 사용된 링크기구부의 발생된 좌표계와 변이구속함수, 구동구속함수, 그리고 자유도의 수는 표 1에 나타내었다.

또한 운동의 기구학적 분석을 위해 필요한 각 링크기구부의 초기위치와 각 링크에 부착된 좌표계에 관한 조인트의 초기 위치벡터들을 각 실린더의 최소길이를 초기 위치로 하였다.

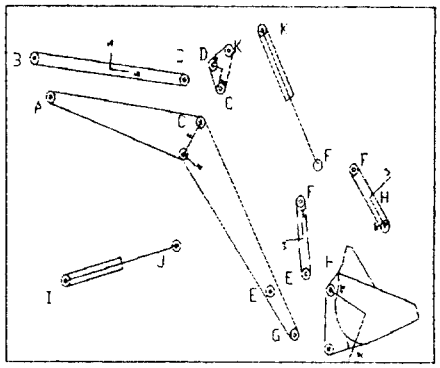

Fig. 1 Model of loader mechanism

Table 1 Model for Loader mechanism

Bodies	7 bodies × 3 coordinates nc = 21
Constraints	revolute joint constraints 8 × 2 = 16 ground constraints + 3 number of holonomic eqns. nh = 19
D.O.F.	dof = nc - nh = 21 - 19 = 2

가. 시뮬레이션 프로그램의 구성

기구학적 분석을 위한 시뮬레이션 프로그램은 기구부를 구성하는 요소들의 선택과 요소들 사이에 작용하는 기구학적 구속함수, 그리고 시간에 독립적인 구동구속함수들을 설정하는 것과 관계된다. 즉, 발생된 좌표값들의 수와 서로 독립적인 구속조건들의 수는 같아야 하고 각각의 요소에 부여된 좌표계는 동력학적 해석을 고려한다면 각 요소의 질량중심에 위치하게 된다. 이상의 조건들을 고려하여 제작한 기구학적 시뮬레이션 프로그램은 크게 세 개의 부분으로 분류할 수 있으며 이러한 프로그램의 구성은 그림 2와 같다.

PREPROCESSOR
● 시스템을 구성하는 요소들의 번호를 결정 ● 시스템을 구성하는 기구학적 조인트와 드라이버의 결정 ● 시뮬레이션의 시간간격, 수치해석법, 허용오차 결정

▼

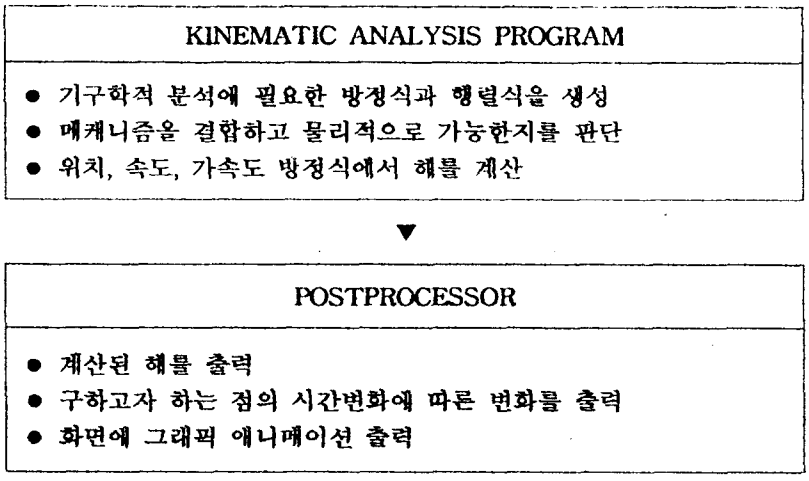

Fig. 2 Computational flow of kinematic analysis.

나. 기구학적 시뮬레이션

로더 기구부의 기구학적 분석을 위해 각 링크들을 균일한 재질로 가정하여 링크의 중심을 구한 후 그림 3과 같이 지역좌표계를 각 링크의 중심에 부착하면 발생 좌표계(generalized coordinates)의 수는 21개로 나타낼 수 있으며 식 (1)과 같다.

$$q = [\ x_1, y_1, \phi_1, x_2, y_2, \phi_2, x_3, y_3, \phi_3, \ \ldots\ , x_7, y_7, \phi_7\ ]^T \qquad (1)$$

또한 로더 기구부에서 정의된 독립변수들은 서로 종속적이므로 독립변수의 수에서 기구부의 자유도를 뺀 만큼의 구동구속함수가 존재하며, 독립변수의 수에서 구동 구속함수를 뺀 만큼의 변이구속함수가 존재하게 된다. 따라서 19개의 변이구속함수와 2개의 자유도 만큼의 구동구속함수가 주어지게 되므로 이들 함수들을 이용하여 로더 기구부의 역동력학적인 분석이 가능하였다.

로더 기구부의 각 연결조인트의 변이구속함수($\Phi^K(q)$)는 회전조인트의 구속함수에 의해 식 (2)로, 기구부를 구동하기 위한 구동구속함수($\Phi^D(q,t)$)는 구동절의 상대거리 구속함수에 의해 식 (3)으로 나타내었다. 또한 식 (2)와 식 (3)의 구속함수를 시간에 대해 1차미분하면 속도 방정식을, 2차 미분하면 가속도방정식을 얻을 수 있기 때문에 로더 기구부에 관한 속도 방정식과 가속도 방정식은 각각 식 (4)와 식 (5)로 나타낼 수 있다.

$$\Phi^K(q) = 0 \quad \text{(revolute joint constraints)} \qquad (2)$$

$$\Phi^D(q,t) = 0 \ \text{(relative distance driving constraints)} \qquad (3)$$

$$\Phi_q \dot{q} = -\Phi_t \equiv \nu \qquad (4)$$

$$\Phi_q \ddot{q} = -(\Phi_q \dot{q})_q \dot{q} - 2\Phi_{qt}\dot{q} - \Phi_{tt} \equiv \gamma \qquad (5)$$

where, Φ_q : Jacobian matrix

기구부를 구성하는 각 링크들의 시간변화에 대한 위치를 분석하기 위해 뉴톤-랍슨의 수치해석 방법을 이용하였고, 속도·가속도 방정식의 해를 얻기 위해 가우스 소거법을 이용하였다. 또한 초기위치에서 다음 시간간격의 위치를 얻기 위해 아담스-베시포드 프리딕터를 이용하였다.

4. 결과 및 고찰

로더 기구부의 운동을 실제 로더 장치의 작업수행시의 운동으로 시뮬레이션하기 위해 붐의 운동이 5초동안 완전히 수행된 후에 버킷의 운동이 연속하여 3초동안 수행되는 것으로 가정하여 기구학적 시뮬레이션을 하였으며 이들을 CAD프로그램에 의해 각 시간에 대한 조인트의 위치를 비교·분석하였다.

가. 각 조인트의 위치분석

기구학적 시뮬레이션 결과로 부터 얻어진 각 조인트들의 위치를 CAD도면과 시간별로 비교한 결과 이론적인 분석결과와 CAD 결과와의 오차는 대부분의 링크에서 0.0001~0.002(m)로 나타났으며 이는 이론적 분석에서 고려하지 않은 핀과 링크사이에 존재하는 공차와 초기위치에서 기구부의 운동방정식을 수치해석적으로 해석하는 과정에서 발생한 오차가 운동이 완료될 때까지 계속 유지되어 나타난 것으로 생각된다. 그러나 이러한 오차는 거의 무시할 수 있는 정도이며 본 연구에서 개발한 기구학적 시뮬레이션 프로그램은 트랙터 부착용 로더 기구부의 위치를 정확하게 구할 수 있는 것으로 판단된다.

그림 3에서 그림 6까지는 0~8초 까지의 로더 기구부의 운동을 시뮬레이션한 결과를 보여주고 있다. 이 시뮬레이션 결과를 종합하여 볼 때 각 조인트의 X축에 대한 좌표값의 변화는 시간변화에 따라 완만한 변화를 보인 반면 Y축에 대한 좌표값의 변화는 X축에 대한 좌표값의 시간변화에 비하여 큰 변화를 나타내고 있음을 알 수 있다. 즉, 고정 조인트 A, B, I에 대한 제한적인 회전운동이 로더 기구부의 회전운동으로 나타난다고 볼 수 있다.

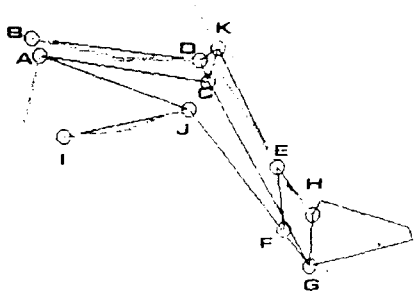

Fig. 3 Graphic output at time=0 by simulation

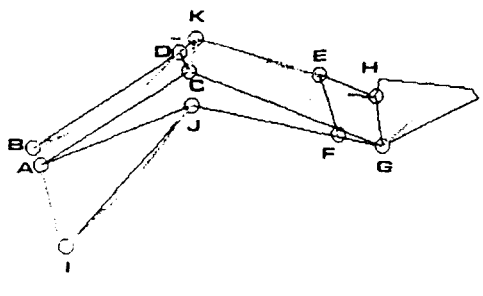

Fig. 4 Graphic output at time=3 by simulation

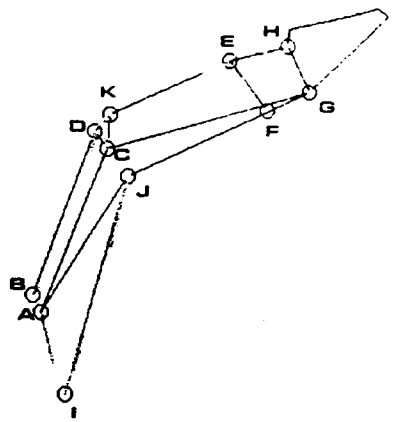

Fig. 5 Graphic output at time=5 by simulation

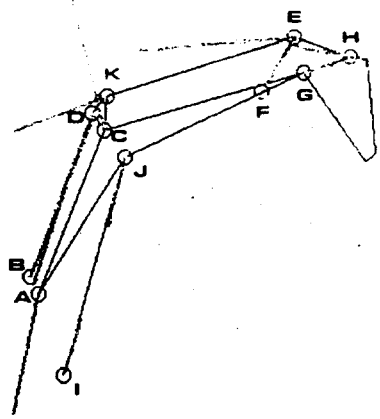

Fig. 6 Graphic output at time=8 by simulation

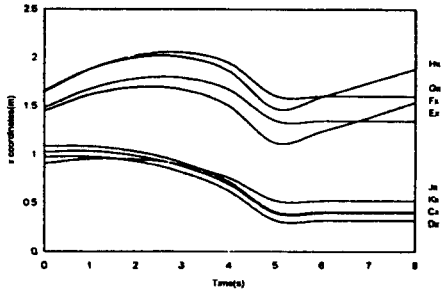

Fig. 7 x coordinates versus time

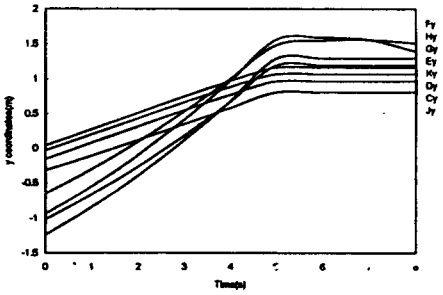

Fig. 8 y coordinates versus time

그림 7은 8초 동안 시간에 따른 x좌표의 변화를 보여 주고 있다. 이 그림으로 부터 조인트 H와 F, 조인트 G와 E, 그리고 조인트 C, D, J, K의 x좌표의 변화 양상은 서로 비슷함을 알 수 있다. 조인트 E, F, G, H에서의 x좌표는 증가하다가 감소하거나 안정된 양상을 보였으며 초기위치에 대한 변화량은 20~30cm로 그리 크지 않은 것으로 나타났다. 한편, 조인트 C, D, J, K에서의 x좌표는 5초 까지 계속 감소하다 5초 이후에는 거의 변화가 없는 것으로 나타났으며 초기위치에 대한 변화량은 0.5m이상인 것으로 나타났다. 이처럼 5초 이후에 조인트 C, D, E, G, J, K에서 x좌표의 변화가 없는 것은 붐의 운동이 5초 동안 완전히 수행된 후에 버킷의 운동만 3초 동안 진행되어 졌기 때문이며, 조인트 H와 F의 x좌표가 증가한 것은 붐의 운동에 따른 상승작용이 나타난 것임을 알 수 있다. 위의 결과를 볼 때 시뮬레이션에 입력된 로더 기구의 x방향의 최대변이는 0.5m전후 임을 알 수 있다.

그림 8은 시간에 따른 y좌표의 변화를 8초 동안 나타낸 것이다. 모든 조인트들은 비슷한 양상을 보였으나 조인트 C, D, J, K는 완만한 증가를 보인반면 조인트 E, F, G, H는 상대적으로 급격한 증가를 보였다. 5초에서 y좌표의 증가각 멎은 이유는 x좌표에서와 마찬가지로 붐의 운동이 5초 동안만 수행되었고 그 후의 운동은 버킷의 운동으로 연결된 것으로 보여진다. 조인트 E, F, G, H의 y방향의 최대 변이는 1m전후인 것으로 나타났으며 조인트 C, D, J, K의 y방향 최대변이는 2m 이상인 것으로 나타났다. 위의 결과로 부터 시뮬레이션에 입력된 로더 기구부의 y방향의 변이는 조인트에 따라 1m에서 최대 2m이상임을 알 수 있다.

나. 각 링크들의 속도와 가속도 분석

로더 기구부를 구성하고 있는 각 링크들의 속도·가속도를 시뮬레이션 한 결과 앞의 위치분석과 같이 모든 링크들이 붐실린더의 운동이 끝나고 버킷실린더의 운동이 시작하는 순간에 급격한 변화를 보이는 것으로 나타났다.

그림 9에 나타난 각 링크들의 속도분석에 나타난 바와 같이 붐실린더의 운동에는 모든 링크들이 약간의 차이를 보이며 일정한 수준을 유지하였지만 버킷실린더의 운동이 시작되자 붐과 붐지지대, 그리고 삼각링크는 정지한 상태에서 버킷실린더의 운동으로 버킷과 버킷링크의 속도가 증가하다가 버킷의 운동이 완료되는 상태에서 급격한 속도의 증가가 나타나는 경향을 나타내었다. 이러한 경향은 붐실린더의 최대변이에서 버킷이 운동을 시작하자 버킷의 자중에 의해 큰 속도의 변화를 나타내는 것으로 판단된다.

또한 그림 10의 가속도 분석의 결과도 붐실린더의 운동이 끝나고 버킷실린더의 운동이 시작되면서 버킷과 버킷링크의 가속도가 크게 증가하는 속도 분석의 결과와 거의 동일한 경향을 나타내었다.

따라서 붐실린더의 운동이 끝나고 버킷실린더의 운동이 시작하면서 모든 링크들의 속도·가속도의 변화가 나타나며 특히 버킷과 버킷링크의 속도·가속도는 크게 변화됨을 알 수 있었다.

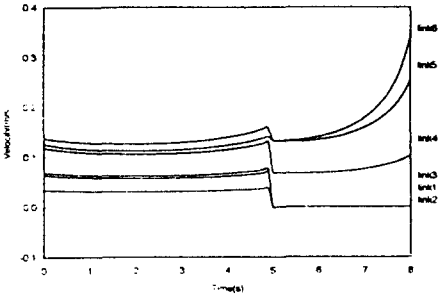

Fig. 9 Change in velocity of each links

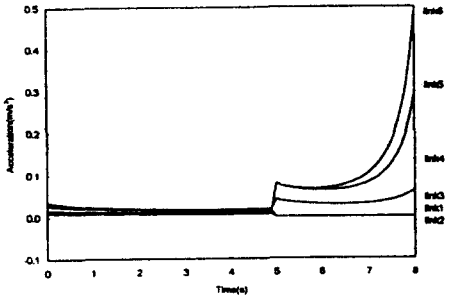

Fig. 10 Change in acceleration of each links

다. 버킷의 속도와 가속도 분석

로더 기구부의 작업성능을 좌우하는 버킷부의 운동속도와 가속도는 그림 11과 같이 붐의 운동이 시작되면서 속도와 가속도의 작은 감소가 유지되다가 붐의 운동이 완료될 시점에서 가속도가 증가하였으며 버킷의 운동이 완료되는 시점에서 속도와 가속도가 급격하게 증가하는 것으로 나타났다. 이러한 현상은 로더 기구부의 최고높이에서 다른 링크에 비해 큰 중량을 갖는 버킷의 운동이 중력의 영향을 받아 급격한 속도와 가속도의 증가를 보이는 것으로 판단되어지며 버킷과 버킷에 실리는 중량이 증가할수록 크게 나타날 것으로 예측된다.

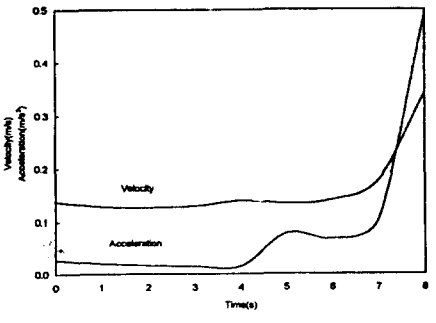

Fig. 11 Change in velocity and acceleration of the bucket

5. 결론

본 연구에서는 트랙터 부착용 로더 기구부의 설계에 이용이 가능한 시뮬레이션 프로 그램을 역동력학적 해석방법을 이용하여 개발하였다. 또한 로더 기구부의 분석 결과는 CAD 프로그램으로 부터 구한 결과와 비교하여 검증하였다. 동력학적 결과는 실험에 의해 검증하였다. 본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 각 조인트의 시간변화에 대한 위치·속도·가속도를 분석할 수 있는 시뮬레이션 프로그램을 개발하였으며 각 조인트의 시간변화에 대한 위치분석을 CAD 프로그램을 이용하여 검증한 결과 시뮬레이션 프로그램의 상대 오차의 범위는 2×10^{-3}(m)의 차이인 것으로 나타나 이론적인 분석이 유효한 것으로 판단되었다.
2. 로더 기구의 작업성능에 큰 영향을 미치는 버킷부의 운동속도는 낮은 값을 유지하다 버킷의 운동이 완료되는 시점에서 급격히 증가하는 것으로 나타났고 가속도 또한 작은 값을 유지하다 버킷 실린더의 운동이 시작되면서 크게 증가하는 것으로 나타났다. 따라서 최고 높이에서 버킷의 틸링시 최대의 반작용력이 작용함을 알 수 있었다.
3. 로더 기구부를 구성하고 있는 각 링크들의 속도·가속도를 시뮬레이션한 결과 모든 링크들이 붐실린더의 운동이 끝나고 버킷 실린더의 운동이 시작하는 순간에 급격한 변화를 보이는 것으로 나타났으며 이러한 경향은 붐실린더의 최대 변위에서 버킷이 운동을 시작하자 버킷의 자중에 의해 큰 속도의 변화를 나타내는 것으로 판단된다.

참고문헌

1. Paul, B., "Computer Analysis of Machines with Planar Motion.", J of Applied Mechanics, September, 1970.
2. Chace, M. A., Smith, D. A. "DAMN-Digital Computer Program for the Dynamic Analysis of Generalized Mechanical Systems", SAE710244, 1971.
3. Shelth, P. N., "IMP(Integrated Mechanisms Program), A Computer-Aided Design Analysis System for Mechanisms and Linkage." Trans. ASME, 1972.
4. D.M.Alley, "Digital Control of a Front-End loader Linkage.", IEEE Trans. vol. IE-29, No. 3, pp.220-224, 1982.
5. Wehage, R. A., and Haug, E. J., "Generalized Coordinate Partitioning for Dinemsion Reduction in Analysis of Constrained Dynamic Systems", Journal of Mechanical Design, vol.104, no.1, pp.247-255, 1982.
6. Kwang-Mo Noh, "Self-tuning Controller for Farm Tractor Guidance", Iowa Univ. 1984.
7. Haug, E. J., "Intermediate Dynamics", Allyn & Bacon, Newton, Mass., 1989. 19. Edward J.Haug, "Computer-Aided Kinematics and Dynamics of Mechanical System", 1989.
8. Erdman Sandor, 2nd ed. "Mechanical Design-Analysis and Synthesis", volume I, PrenticeHall, 1991.