휠로더의 3 차원 모델링 및 시뮬레이션

박준용† · 유완석* · 김희원** · 홍제민** · 고경은**

Three Dimensional Modeling and Simulation of a Wheel Loader

Junyong Pak, Wansuk Yoo, Heuiwon Kim, Jemin Hong, Kyoungeun Ko

Key Words : Multibody Dynamics(다물체동역학), Crawler type(무한궤도식), Wheel type(휠타입), Wheel loader(휠로더), Bump(범프)

Abstract

This paper presents a three dimensional modeling and simulations of operation and running of a wheel loader using the ADAMS program. A wheel loader consists of a bucket, a boom, a crank, a front frame, a rear frame, a bucket cylinder, two boom cylinders, two steering cylinders, nine spherical joints, six universal joints, five translation joints, three inline joints, a revolute and a fixed joint. Judging from the actual degrees of freedom of the wheel loader, proper kinematic joints are selected to exclude redundant constraints in the modeling. Through the running simulation over a bump with the three dimensional modeling, the joint reaction forces are calculated.

1. 서 론

다물체동역학(multibody dynamics)은 여러 개의 물체로 이루어진 공간상의 다물체계에 대한 운동을 다루는 학문이다. 운동해석을 통하여 조인트로 연결된 물체의 위치, 속도, 가속도 뿐만 아니라 조인트에서 생기는 반력이나 진동에 대한 정보도 얻을 수 있다. 다물체동역학 분야의 연구는 기계 및 로봇 분야를 비롯하여 항공 우주 분야에 이르기까지 다양한 분야에 적용하여 활발하게 연구가 진행되고 있으며[1], 응용 범위 또한 점점 넓어지고 있는 추세이다. 다물체동역학의 연구가 활발해 짐에 따라 DADS[2] , ADAMS[3] , RcurDyn[4] 등과 같은 동역학 해석 범용프로그램들이 산업체 및 학계에서 많이 사용되고 있다.

Fig. 1에서와 같은 건설 중장비인 로더(loader)는 주로 건설공사에서 자갈, 모래, 흙 등을 퍼서 덤프차에 적재하는 장비로서 무한궤도식(crawler type)이나 휠타입(wheel type)이 있으며, 기동성을 고려하여 휠타입인 휠로더(wheel loader)가 많이 사용되고 있다. 휠로더는 고무 타이어 트랙터 앞에 버켓(bucket)을 설치한 로더이며, 평탄한 작업장에서는 기동성이 신속할 뿐만 아니라 작업수행에도 능률이 높다. 원거리를 이동할 때 운반기계에 의존하지 않아도 되나 늪지나 무른 땅에서의 작업은 곤란한 결점이 있다.

본 연구에서는 휠로더를 여러 개의 강체로 이루어진 3 차원 다물체계로 모델링하였으며, 동역학 해석용 범용프로그램인 ADAMS 를 사용하여 주행 시뮬레이션을 수행하고 조인트에 걸리는 반력을 구하였다[5~7].

Fig. 1 Wheel loader

† 부산대학교 기계설계 대학원
E-mail : johnny23@korea.com
TEL : (051)510-1457 FAX : (051)512-9835
* 부산대학교 기계기술연구소
** 현대중공업 선박해양연구소

2. 휠로더의 강체모델링

2.1 버켙과 붐의 모델링

휠로더를 ADAMS 에서 모델링하기 위하여 Fig. 2 와 같이 버켙(bucket)과 붐(boom)이 있는 부분을 먼저 고려하였다. 버켙과 붐 부분의 구성은 총 11 개의 물체로 구성하였으며, 물체들 사이에는 구면조인트 6 개, 유니버셜 조인트 4 개, 병진 조인트 3 개, 인라인 조인트 2 개, 회전조인트가 1 개가 있으며, 프론트 프레임(front frame)은 고정된 것으로 가정하였다. 이에 따라 자유도를 계산해 보면, 전체 물체의 좌표 수는 66 개이며 구속식의 수는 64 개이다.

따라서 이 시스템은 2 개의 자유도, 즉 붐 실린더(boom cylinder)와 버켙 실린더(bucket cylinder)의 병진 운동, 을 가진다. 붐 실린더 및 버켙 실린더의 구동조건식 2 개를 고려할 때 자유도가 영(zero)인 시스템으로 구성하였다.

2.2 작업부 전체의 모델링

Fig. 2 와 같이 구성한 작업장치 부분에 대한 모델링 검증한 후 Fig. 3 과 같이 버켙, 붐(boom), 크랭크(crank), 프레임, 버켙 실린더, 붐 실린더, 조향 실린더(steering cylinder)로 이루어진 시스템을 구면 조인트 9 개, 유니버셜 조인트 6 개, 병진조인트 5 개, 인라인 조인트 3 개, 회전 조인트 1 개 그리고 1 개의 고정 조인트로 구성하였다.

휠로더 전체 시스템의 구동은 버켙 실린더의 병진 운동, 붐 실린더의 병진 운동, 그리고 조향 실린더의 병진 운동으로 총 3 개의 자유도를 가지고 있는 시스템으로 모델링하였으며, 구동조건식 3 개를 고려할 때 자유도가 영(zero)인 시스템으로 구성하였다.

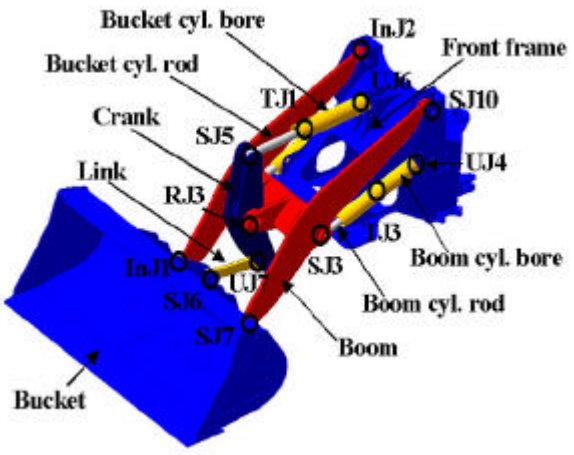

Fig. 2 Modeling of a bucket, a boom

3. 휠로더의 주행 시뮬레이션

3.1 휠로더 주행 시나리오

휠로더는 무한궤도식 로더와 달리 상대적으로 고속 주행을 하면서 작업을 수행한다. 따라서, 주행으로 인한 각 조인트 반력을 알아보고자 ADAMS 를 이용하여 휠로더의 주행 시뮬레이션을 수행하였다. ADAMS/View 에서 기본적으로 제공하는 타이어 정보 파일(TPF, tire property file)를 사용하여 휠로더의 타이어를 구성하였으며, 노면 정보 파일(RDF, road data file)을 사용하여 휠로더가 주행할 노면을 구성하고 범프를 만들어 사용하였다. 타이어에 들어가는 기본적인 상수값은 현대중공업 선박해양 연구소의 자료를 이용하였다.

Fig. 5 와 같이 주행 시뮬레이션에서 쓰인 타이어는 ADAMS 에서 기본적으로 제공하는 Fiala tire model 을 사용하였다. Fiala tire model 은 사각 패치(rectangular contact patch)로 이루어져 있으며, 기본

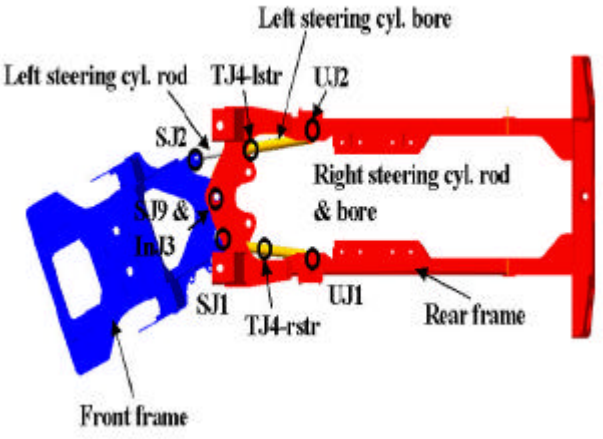

Fig. 3 Modeling of a front frame and a rear frame

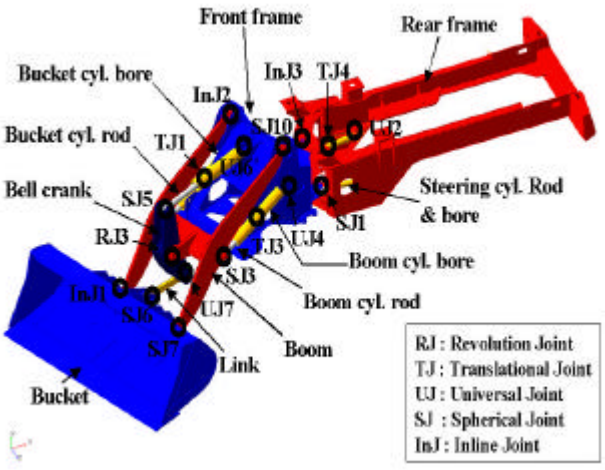

Fig. 4 Modeling of a wheel loader

적으로 타이어 하나가 20 개의 사각 패치로 이루어져 있으며, 타이어를 만들어지면서 같이 생성되는 노면은 삼각 패치(triangular patch)로 나타내어진다. 삼각 패치로 생성되는 노면은 사용자가 노면 정보 파일을 이용하여 원하는 형태로 만들 수 있도록 삼각 패치를 이루는 노드 번호와 노드의 좌표를 노면 정보 파일에 입력함으로써 완성된다.

타이어 정보 파일에는 10 가지의 정보를 입력하도록 되어있으며, 그 내용은 Table 1과 같다. Table 1 에 입력된 값 외에도 타이어의 질량, 타이어의 폭 등이 입력되어야 하며, 가장 중요한 타이어 각속도가 입력되어야 한다. 타이어의 각속도는 물체의 선속도를 반지름의 값으로 나누어 준 값을 입력하면 된다. 타이어 정보 파일과 노면 정보 파일을 만든 후, 타이어의 부착 지점에 마커(marker)를 생성하게 되는데 이 때, 마커의 X 축 또는 –X 축이 진행방향으로, Z 축이 타이어의 회전축이 되도록 설정을 해 주어야 한다.

그리고 노면 정보 파일을 이용하여 Fig. 6 과 같이 높이 100mm, 경사도 60° 인 범프를 생성하였다.

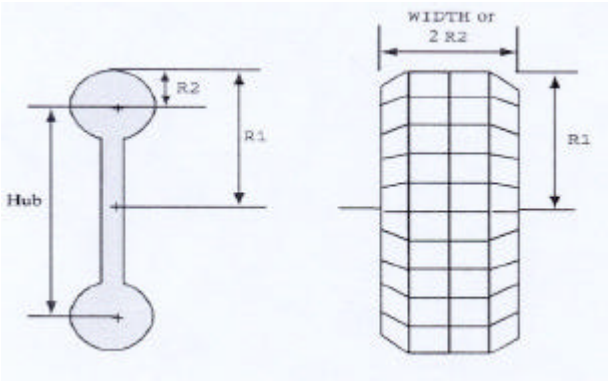

Fig. 5 tire model

Table 1 **Tire properties required in ADAMS**

Item	Value	Descripton
R1	745mm	Undeflected outside tire radius
R2	415mm	Toroidal cross section carcass radius
CN	1035.86 N/mm	Vertical stiffness at zero deflection
CSLIP	100	Longitudinal stiffness at zero slip ratio
CALPHA	100	Lateral stiffness due to slip angle at zero slip angle
CGAMMA	80	Lateral stiffness due to inclination angle at zero inclination angle
CRR	0.001	Rolling resistance moment
RDR	0.75	Vertical damping ratio
U0	0.94	Maximum friction coefficient
U1	0.74	Minimum friction coefficient

3.2 휠로더의 주행 시뮬레이션

휠로더의 주행 시뮬레이션은 Fig. 7 과 같이 평탄 노면을 주행하는 것과 Fig. 8 과 같이 높이 100mm 의 범퍼 위를 주행하는 것으로 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션 시간은 9 초를 수행하였으며, 속력은 10km/h 로 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션을 하기 전에 반드시 모델의 정적 평형 위치에서 시뮬레이션을 수행할 수 있도록 정적평형(static equilibrium) 상태를 만들어야 된다. 정적평형에 도달하지 않은 상태에서 동적 시뮬레이션(dynamic simulation)을 시작할 경우, 초기조건(initial condition)이 달라지므로 시뮬레이션 마다 다른 결과를 얻게 된다.

휠로더가 평탄 노면과 범프 위를 주행함에 있어서 주요 조인트 반력을 비교하여 보았다. Fig. 9 는 SJ7 의 로컬 좌표 X 축 반력을, Fig. 10 은 UJ7 의 로컬 좌표 X 축 반력을, Fig. 11 은 RJ3 의 로컬 좌표 X 축 반력을, Fig. 12 는 SJ3 의 로컬 좌표 X 축 반력을 각각 비교하여 나타내었다.

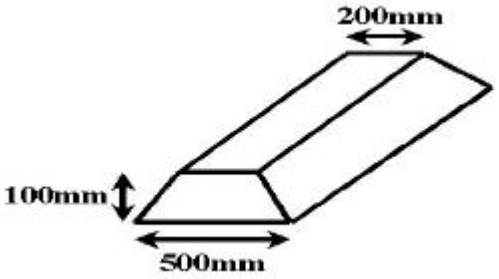

Fig. 6 Shape of a bump

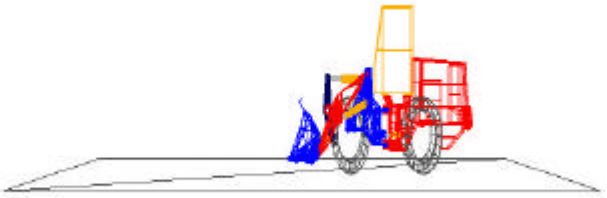

Fig. 7 Driving simulation on the flat road

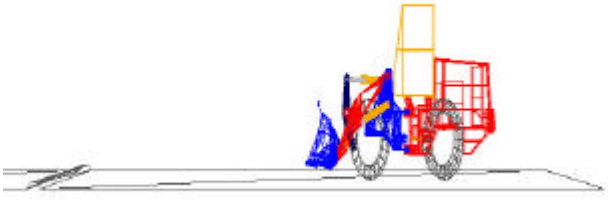

Fig. 8 Driving simulation on the bump

ADAMS 에서 만든 노면은 노이즈(noise)가 없는 매우 평탄한 노면으로 표현되기 때문에 평탄 노면에서의 조인트 반력은 질량에 의한 일정한 값으로만 나타났다. 휠로더의 범프 주행시 각 조인트의 반력값은 처음 부딪혔을 때 제일 크게 나타났으며, 이후 감쇠되는 것을 알 수 있다.

Fig. 13 은 왼쪽 앞 바퀴와 프론트 프레임(front frame)이 연결되는 부분의 글로벌 좌표 Z 축 반력이며, Fig. 14 는 왼쪽 뒷 바퀴와 리어 프레임(rear frame)이 연결되는 부분의 글로벌 좌표 Z 축의 반력이다. 휠로더가 범프를 주행할 경우, 앞 바퀴가 범프에 부딪혔을 때 뒷 바퀴에도 그 영향이 나타나는 것을 알 수 있다.

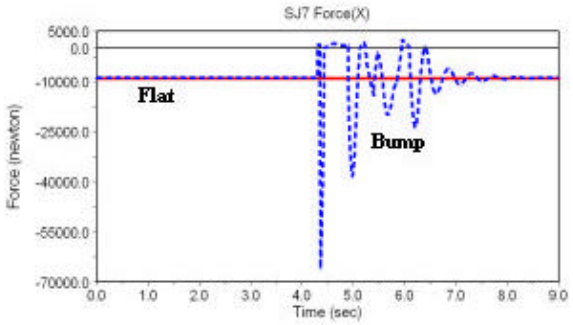

Fig. 9 Joint reaction force along local X direction (SJ7)

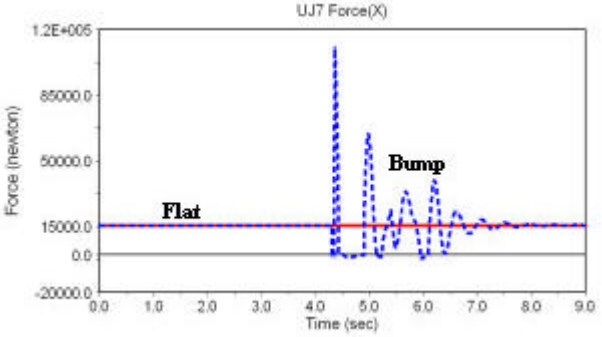

Fig. 10 Joint reaction force along local X direction (UJ7)

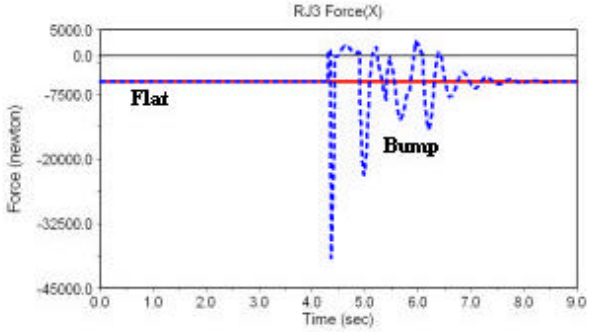

Fig. 11 Joint reaction force along local X direction (RJ3)

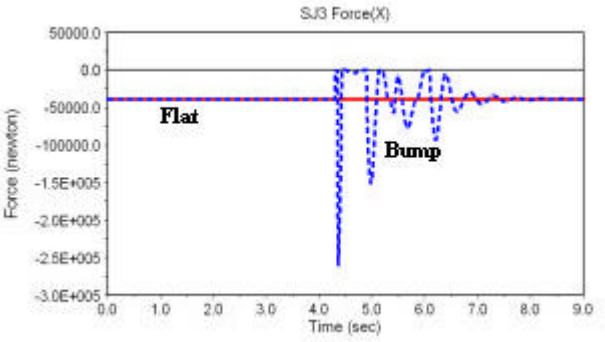

Fig. 12 Joint reaction force along local X direction (SJ3)

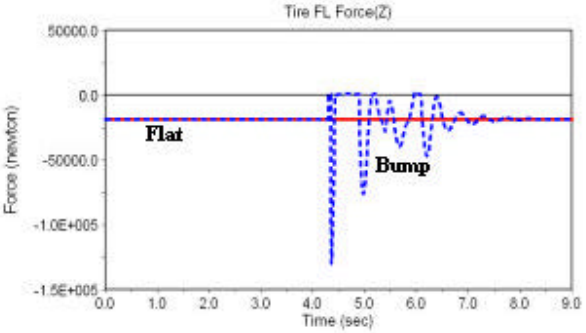

Fig. 13 Reaction force at the front left tire along the global Z direction

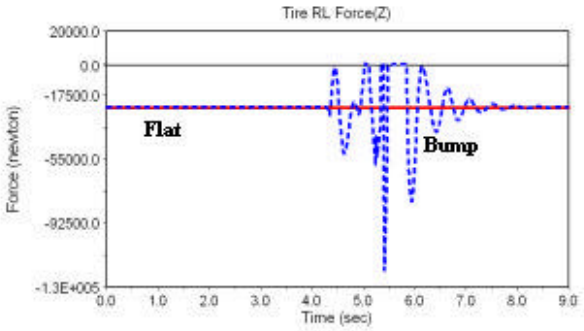

Fig. 14 Reaction force at the rear left tire along the global Z direction

4. 결 론

동역학 해석 범용프로그램인 ADAMS 로 3 차원 모델링을 수행하고, 작업 및 주행 시뮬레이션을 수행하여 휠로더에 대한 동역학적 해석모델을 개발하였다.

휠로더의 해석모델에는 버켓, 붐, 크랭크 등 모두 16 개의 물체와 구면 조인트, 유니버셜 조인트, 병진 조인트, 인라인 조인트, 회전 조인트 그리고 고정 조인트로 이루어진 3 차원 다물체계로 모델링을 하였다.

버켙 실린더, 붐 실린더, 조향 실린더의 병진 운동으로 모두 3 개의 자유도를 가지고 있는 시스템으로 구성하였으며, 자유도 계산을 통하여 모델을 검증하였다.

평탄 노면과 범프 위를 주행하는 시나리오를 가지고 ADAMS 에서 휠로더의 주행 시뮬레이션을 수행하였다. 평탄 노면과 범프 주행에서 SJ7, UJ7, RJ3, SJ3 조인트의 로컬 좌표의 X 축 반력을 비교하였으며, 왼쪽 앞바퀴와 뒷바퀴가 연결되는 부분의 글로벌 좌표 Z 축 반력을 비교하였다. 계산된 반력은 각 부품의 설계와 내구수명 계산에 사용되어 질 수 있다.

ADAMS 에서 구현된 노면은 노이즈(noise)가 없는 매우 평탄한 노면이기 때문에 평탄 노면에서의 각 조인트 반력은 질량에 대한 일정한 값으로 나타났으며, 휠로더가 범프를 주행할 시 앞바퀴의 충격이 뒷바퀴에도 영향을 미치는 것을 알 수 있었다.

후 기

본 연구는 현대중공업 선박해양 연구소의 지원으로 이루어졌으며, 지원해 주신 관계 기관에 감사 드립니다.

참고문헌

(1) Kim., O. J., Yoo., W. S., Lee., B. H., Lee., M. H., Yoon., K. H., 1993, “Three Dimensional Modeling and Inverse Dynamic Analysis of An Excavator,” *Trans. of KSME*, Vol.17, No.8, pp.2043~2050

(2) DADS(Dynamic Analysis and Design System), LMS International.

(3) ADAMS(Automated Dynamic Analysis of Mechanical system), MSC Software, U.S.A.

(4) RecurDyn(Recursive Dynamics), FunctionBay. Inc, Seoul, Korea

(5) Yoo., W. S., Lee., B. H., Kim., O. J., Kang., H. K., 1994, “Road Simulation and Reaction Force Calculation of Excavator,” Technical Reoprt, RIMT (Research Institute of Mechanical Technology), Pusan National University, Pusan, Korea

(6) Kwon., S. K., Park., H. J., Suh., M. S., Kim., H. G., 1996, “Development of Simulation system for Front Attachment of Excavator,” *Trans. of KSME (A)*, Vol.20, No.5, pp.1401~1410

(7) Yoo., W. S., 2003, “Development of Simulation System using Flexible Multibody Dynamics,” Technical Report, RIMT (Research Institute of Mechanical Technology), Pusan National University, Pusan, Korea