

굴삭기의 저크현상 시뮬레이션을 위한 기구동역학 모델링 및 해석

임홍재* °성상준** 이규령** 유영석*** 최준엽*** 이동욱*** 이승구***

Kinematic and Dynamic Modeling and Analysis for Jerk Simulation of the Excavator

H.J. Yim, S.J. Sung, K.R. Lee, Y.S. Ryou, J.E. Choi, D.W. Lee, S.K. Lee

ABSTRACT

In this paper, a kinematic and dynamic model for an excavator is presented. A graphic user interface program for kinematic-dynamic analysis for the excavator is developed. To predict the stiffness and damping properties of the joint between the vehicle and the track, a parameter study is executed. Using the predicted joint stiffness and damping, the jerk simulation for the excavator is reproduced. Simulation results are compared with the test results to confirm the validity of the simulation model.

1. 서론

최근 국내 중공업회사들이 굴삭기, 크레인, 지게차, 스키드로더 등의 각종 건설 중장비 기계를 국산화하여 내수뿐만 아니라 외국에도 수출하는 물량이 점증하고있다. 이와 같이 이 분야의 매출액이 급격히 늘어나면서 각 관련 기업에서는 국제경쟁력을 제고하기 위한 많은 노력을 기울이고 있으며 특히 국내 독자 고유모델의 개발을 위하여 많은 노력을 기울이고 있다. 그러나 기구동역학적인 해석 및 설계기술의 확보에 많은 어려움을 겪고

있는데 그 가장 큰 원인 중 하나가 기구동역학적인 해석 및 설계경험이 많은 전문인력의 부족이다. 또한, 최근 국내에 많이 도입된 기구동역학 해석 관련 응용소프트웨어들도 고도의 경험과 전문지식이 없이는 사용하기가 어려워 경험이 많은 엔지니어 외에는 거의 사용하지 못하고 있는 실정이다.

특히 유압굴삭기의 대형화, 고성능화, 다목적화에 따라 구조물의 동적 설계의 필요성이 증가하고 충격 및 관성에 의한 부하를 무시할 수 없게 되었다. 원래 유압굴삭기는 굴삭, 선회작업, 덤프작업 동작을 1사이클로 행하는 토공기계로서 구조물에는 그 진동 특성에 의하여 동적 하중이 발생한다. 유압굴삭기의 Swing frame은 굴삭기 구조물 중에서 동적 하중에 영향을 받는 빈도가 높은 구

* 국민대학교 기계·자동차공학부
** 국민대학교 기계설계학과 대학원
*** 대우중공업

조물이다. 즉 Swing frame은 굴삭작업 혹은 주행 상태에서 돌기물을 타고 넘을 시 차체가 요동하고 Counter weight 및 Swing frame 자중에 의해 관성 부하가 작용한다. 이러한 현상을 적절히 제어하지 못하면 장비가 불안정해지고 승차감에 불쾌감을 주며 차체에 심각한 영향을 줄 수 있다. 따라서 굴삭기 개발시 장비의 동적 안정성 및 구조물의 동적 성능 파악은 매우 중요하며 선진 업체인 미쓰비시, 히타치 등에서는 이미 이러한 동적 설계 시스템이 구축되었다. 즉 이런 설계시스템을 이용하여 굴삭기의 기구동역학 해석, 피로해석 등 장비의 동적 거동을 판단하는 자료로 삼고 있다. 또한 하중을 시간의 함수로 나타낼 수 있는 컴퓨터 시뮬레이션 기법^{(1),(2)}이 시험계측을 통한 검증으로 확립됨으로써 설계작업의 일원화 및 통합화를 추구하고 있다. 굴삭기의 안정성은 정적인 상태뿐 아니라 동적인 상태에서도 장비 전체의 무게중심을 스윙센터 포인트에 접근시키는 것이 중요하다. 본 연구에서는 굴삭기의 동적 안정성 해석을 위한 굴삭기의 기구동역학 모델을 개발하고자 한다. 국내 중공업회사에서는 기존의 범용 기구동역학 해석프로그램⁽³⁾을 사용하여 다양한 종류의 연구가 수행되고 있다. 그러나 아무리 좋은 소프트웨어가 있다 하더라도 모델링 기법이나 해석 결과의 이해가 부족하면, 설계 개선 방향을 제시하지 못하게 되고, 그렇게 되면 비싸게 도입한 소프트웨어라도 무용지물이나 다름없을 것이다. 또한 전문엔지니어라도 사용하기가 매우 불편하다면, 사용중 본의 아닌 실수로 인한 여러 가지 오류를 범하기 쉽고, 또한 그 오류를 찾아내기도 그리 쉬운 일이 아니다. 따라서 설계자가 굴삭기의 기구동역학적 해석 및 설계시 각종 시스템의 부품, 기계요소, 조인트 모델링, 기준좌표계설정시에 그래픽환경하에서 3차원 형상 시스템을 확인하면서 모델링을 해보거나 데이터를 입력할 수 있고 또한 컴퓨터 시뮬레이션을 컴퓨터 그래픽으로 볼 수 있는 환경을 구축하는 것이 매우 중요하다. 실제로 최근 미국 및 일본 등에서는

이와 같은 굴삭기 시뮬레이션 프로그램이 활발히 개발되어지고 있으며 실제 생산현장에 응용되기 시작하고 있다. 이러한 필요성에 따라 본 연구에서는 설계 현장에서 설계엔지니어가 용이하게 사용할 수 있는 굴삭기 전용 기구동역학 해석 시뮬레이션 인터페이스 프로그램을 개발하며 개발된 프로그램을 이용하여 굴삭기의 저크현상을 시뮬레이션하고 시험결과와 비교 검증하고자 한다.

2. 굴삭기의 기구동역학 모델링

굴삭기의 메커니즘은 유압력으로 액츄에이터를 구동시키며 액츄에이터가 작업 장치를 움직여 원하는 작업을 수행하도록 되어있다.

굴삭기의 본체에는 프레임, 붐, 암, 버킷, 그리고 4개의 유압 실린더가 장착되어 있다. 굴삭기를 기구동역학적으로 모델링하기 위해서 각각의 강체의 C.G., 관성값, 무게 등은 설계데이터를 사용하였다. 각 액츄에이터는 병진조인트(Translational joint)로 모델링하였으며 각 구성부품간의 기구학적 조인트는 아래와 같다.

Translational joint :

cylinder1_1 to cylinder1_2
cylinder2_1 to cylinder2_2
cylinder3 to cylinder4
cylinder5 to cylinder6

Revolute joint :

ground to frame
frame to boom
boom to arm
arm to bucket
g-link to cylinder6

Spherical joint :

cylinder1_2 to boom
cylinder2_2 to boom
cylinder4 to arm
cylinder6 to g-link
cylinder6 to p-link

Universal joint :

- cylinder1_1 to frame
- cylinder2_1 to frame
- cylinder3 to boom
- cylinder5 to arm
- p-link to bucket

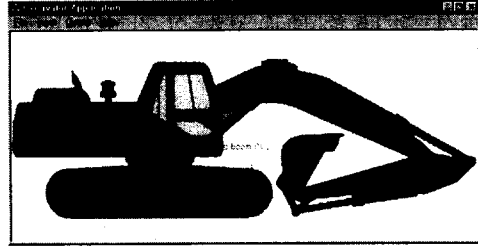


Fig. 1. Program window

3. 굴삭기 전용 그래픽 인터페이스 프로그램 개발

본 연구에서는 굴삭기 전용 기구동역학 해석을 위한 기구동역학 모델링을 용이하게 하기 위하여 사용자가 굴삭기의 설계데이터를 굴삭기의 실제형상 화면위에 마우스로 직접 선택해가며 기구동역학 모델링에 필요한 각종 데이터를 입력할 수 있도록 개발되었다.

Fig. 1은 굴삭기 전용 그래픽 인터페이스 프로그램의 초기화면을 보여주고 있다. 이 초기화면에서 새로운 굴삭기 모델을 생성할 수 있고, 생성된 기존의 모델을 용이하게 변경하여 저장할 수 있도록 되어 있다. Fig. 2는 그래픽화면상의 붐을 선택하여 붐의 질량 및 관성데이터를 그래픽화면상에서 사용자가 직접 입력할 수 있음을 보여준다. 이와 같은 방식으로 굴삭기의 기구동역학 모델링을 완성한 후 기구동역학 해석프로그램을 실행하면 굴삭기의 기구동역학 해석이 수행되며, 사용자가 관심 있는 바디나 특정한 위치에서의 결과 그래프를 출력할 수 있도록 커맨드화일을 생성해 주기 때문에, 기구동역학의 전공지식이 부족한 초보자나 해석프로그램의 사용법을 잘 모르는 설계자도 설계데이터를 용이하게 입력하고 결과 그래프를 출력할 수 있다. 또한, 본 프로그램은 굴삭기의 기구동역학 해석, 저크현상 시뮬레이션이 가능하다.

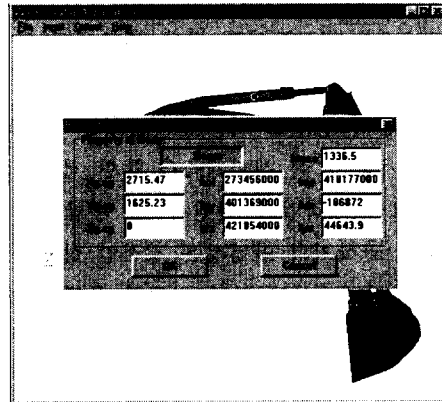


Fig. 2. An example of input dialog box

4. 저크현상 해석을 위한 모델링

저크현상 해석을 위한 모델은 선회결합부의 강성값과 하부주행체인 트랙의 어프로치각으로 인한 상부 선회체의 흔들림현상을 재현하기 위한 것이므로, 선회결합부에 이를 근사하게 나타낼 수 있는

강성과 댐핑값을 주어 시뮬레이션 할 수 있다.

선회결합부에 강성과 댐핑을 모델링 하기 위하여 Ground와 Frame의 연결부위를 부싱(Bushing) 요소로 모델링함으로써 강성과 댐핑을 부여한다. 또한 저크현상 시뮬레이션을 위하여 유압 실린더의 실린더 변위를 시간함수로 나타낼 수 있도록 커브데이터 드라이버를 모델링 한다.

5. 저크현상 시뮬레이션 및 시험검증

저크현상해석을 위하여 선회결합부에 강성과 댐핑값을 주어 시뮬레이션 한다. 선회결합부의 강성과 댐핑값을 추정하기 위하여 파라미터 스터디를 수행하였으며 Sutek사에서 수행한 연구를 참고하였다. 파라미터 스터디를 통하여 본 연구에 사용한 굴삭기의 선회결합부의 강성값은 $K = 1 \cdot 10^{12}$ N/m, 댐핑값은 $C = 1 \cdot 10^{12}$ N·sec/m 으로 추정

되었다.

붐실린더의 시간에 대한 변위선도는 실차 시험 계측을 통하여 얻은 실린더의 속도선도를 적분하여 얻은 변위선도를 사용하였다. Fig. 3은 붐과 암을 최대로 펼쳐 들어올린 상태에서 붐을 특징속도로 하강시키다 급정지할 때의 붐실린더의 속도선도를 보여준다. Fig. 4는 Fig. 3을 시간에 대하여 적분하여 얻은 유압 실린더의 변위선도를 보여준다.

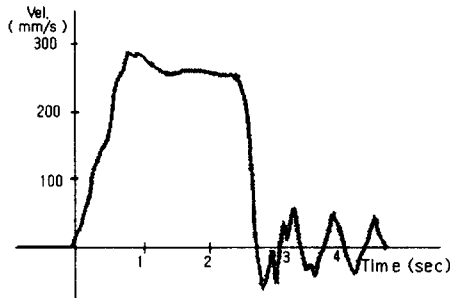


Fig. 3. Velocity curve of boom cylinder

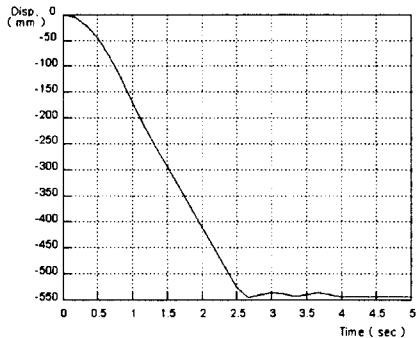


Fig. 4. Displacement curve of boom cylinder

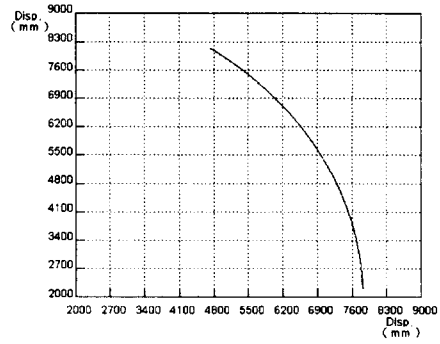


Fig. 5. Motion of bucket

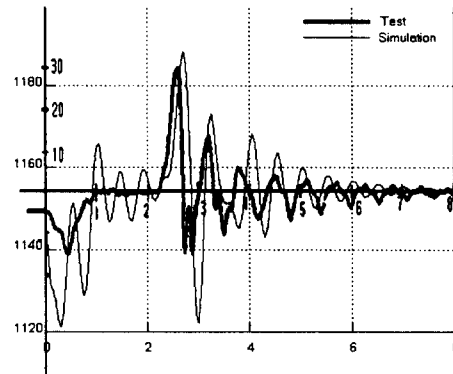


Fig. 6. Comparison of Y-displacement of the frame between the simulation and test results

Fig. 5는 버킷의 끝점의 움직임을 X-Y좌표상에서 보여주고 있다. Fig. 6은 프레임에서 카운터웨이트 부위의 끝점의 수직방향의 시간에 대한 선도로써 시뮬레이션 결과와 시험데이터와의 비교를 나타낸다.

6. 결론

본 연구에서는 굴삭기의 동적 특성을 해석하기 위한 굴삭기의 기구동역학적 모델링을 제시하였고, 이를 전공지식이 없는 초보자도 용이하게 수행할 수 있도록 굴삭기 전용 인터페이스 프로그램을 개발하였다. 이 프로그램을 이용하여 굴삭기의 저크

현상에 대한 시뮬레이션을 수행하였으며, 파라미터 스터디를 통하여 굴삭기의 선회부와 트랙부의 특성을 표현할 수 있는 강성과 댐핑값을 추정하였다. 또한 시뮬레이션의 타당성을 검증하기 위하여 시험데이터와 비교 분석하였다.

참고문헌

1. Haug, Edward J., *Computer-Aided Kinematics and Dynamics of Mechanical Systems (Volume 1: Basic Methods)*, ALLYN AND BACON, 1989.
2. Nikravesh, P. E., *Computer Aided Analysis of Mechanical Systems*, Prentice-Hall, Inc., 1990.
3. CADSI, *DADS Reference Manual Volume I-II, Rev 8.0*, Computer Aided Design Software Inc., 1995.