

〈논 문〉 SAE NO. 97370011

탄성 다물체 해석기법을 이용한 크롤러형 건설장비의 주행 및 선회 동특성 해석

Driving and Swing Analysis of a Crawler Type Construction Equipment Using Flexible Multibody Dynamics

김 형 근*, 서 민 석**
H. K. Kim, M. S. Suh

ABSTRACT

A tool for the dynamic simulation and design technique of the excavator plays an important role in the prediction of dynamic behavior of the excavator in the initial design stage. In this paper, a flexible multibody dynamic analysis model including track of the crawler type excavator is developed using DADS and ANSYS. Through the driving simulation of the excavator travelling over rough road track, frequency characteristics of the upper frame and cabin are obtained, and the reaction forces acting on the track rollers are also presented for the fatigue life estimation. The effect of boom vibration modes on the joint reaction forces and accelerations is presented from the swing simulation.

주요기술용어 : Crawler Type Excavator(크롤러형 굴삭기), Driving Simulation(주행 시뮬레이션), Flexible Multibody Dynamics(탄성다물체 동역학), Vibration Modal Analysis(진동모드해석), Static Correction Mode(정적보정모드)

1. 서 론

최근 각종 건설 및 토목공사에서 굴삭기의 활용이 크게 증가함에 따라 굴삭기의 기능적 품질에 많은 관심이 집중되고 있다. 국내외적으로 굴삭기의 기능적 품질은 평균화되어 가는 추세이며

앞으로의 시장경쟁력은 수명신뢰성, 운전의 편의성, 저진동/저소음 등 비기능적인 품질에 위해서 크게 영향을 받을 것으로 예상되고 있다.

굴삭기 설계기술은 그 역사가 짧아 현재까지도 대부분의 설계가 정역학적 해석 및 설계기술을 바탕으로 기능 및 성능 확보에 대부분의 노력을 경주하고 있는 실정이나 실제 굴삭기의 구조 및 부품 그리고 각종 조인트에 작용하는 하중은 동적이며 또한 충격적이다. 따라서 기존의 정역학

* 정회원, 삼성중공업 건설기계부문 시험기술팀

** 삼성중공업 건설기계부문 시험기술팀

적 설계기술로는 이같은 동적하중에 의한 장비의 거동을 제품개발 초기단계에서 예측 및 평가하여 실제 설계에 반영하기는 어려운 실정이다. 따라서 시제품의 시험에 많은 시간과 경비가 소요되고 제품개발후 예상치 않은곳에서 파손이 일어나서 시행착오적으로 대책을 강구함에 따라 많은 개발비가 소요되고 제품에 대한 신뢰성 문제 또한 뒤따르게 된다.

본 연구에서는 기구/동역학 및 구조해석 소프트웨어인 DADS와 ANSYS를 이용하여 크롤러형 굴삭기에 대한 동역학적 해석모델을 개발하고 주행 및 선회 시뮬레이션을 통해 굴삭기의 동적거동 및 동특성을 평가하고자 한다. 이를 위해 DADS의 트랙모듈(Track superelement)¹⁾을 사용하여 크롤러형 굴삭기의 트랙을 모델링하며 탄성체모듈(Flexible body module)을 이용하여 붐 및 상부프레임의 탄성효과를 고려한다. 굴삭기의 주행 시뮬레이션을 실시하고 주행시 트랙 롤러에 작용하는 반력을 구하며 상부의 선회시 붐의 진동모드를 고려하여 조인트에 작용하는 반력을 구한다. 또한 ANSYS를 이용한 유한요소모델과 DADS를 이용한 강체모델의 결합시의 유의사항을 제시한다.

2. 굴삭기의 강체 모델링

굴삭기의 강체 모델링을 위한 단품의 기본형

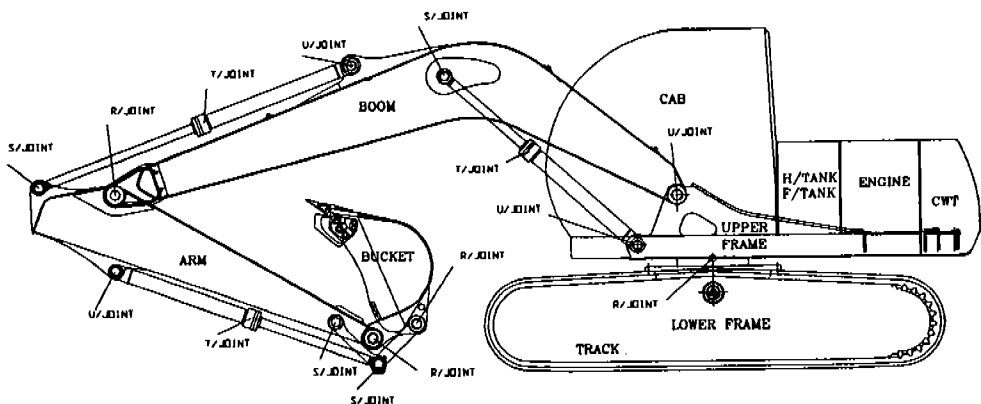


Fig.1 Dynamic model of the excavator

상, 치수, 무게, 무게중심 및 질량관성 모멘트는 도면을 기준으로 하였다. 즉 연료탱크, 유압탱크, 엔진, 카운터웨이트, 유압실린더 등은 3차원 CAD프로그램인 I-DEAS를 사용하여 3차원 모델링을 수행한 후 각 단품의 실측 중량에 근거하여 데이터를 산출하였다. 작업장치는 항후 역동역학(inverse dynamics)이나 기구해석시의 잉여구속(redundancy)을 제거하기 위하여 실제 조인트 형상과는 다르나 작업장치의 움직임울 그대로 재현할 수 있는 조인트를 선정하여 모델을 구성하였다. Fig.1은 굴삭기의 모델에서 고려한 단품과 이들 간의 기구학적 조인트를 나타낸 것이다.

캡(cabin)의 중량 및 관성모멘트는 유한요소 해석을 통한 결과를 이용하였다. 캡과 상부프레임과의 연결부는 실제로 마운트가 연결되는 6지점의 위치에 부싱요소(bushing element)를 이용하여 모델링 하였다. 부싱요소는 삼축방향의 강성과 감쇠성분으로 구성되며 강성 감쇠값은 실험치를 이용하였다.

2.1 트랙의 모델링

트랙(track) 모델링을 위해서는 DADS의 트랙 모듈을 사용하였다. 이 트랙 모듈은²⁾ Fig.2의 탱크와 같은 고속장비를 기준으로 구성되었기 때문에 크롤러 형태의 굴삭기 특성에 맞추기 위하여 많은 수정을 가하였다.

즉, Fig.2에서 각각의 로드암(road arm)은 셋시(chassis)에 회전축을 갖고 셋시에 대해 상대적인 회전운동을 하며 이 회전운동에 대한 강성과 감쇠를 갖고 있다. 로드암의 끝단에는 반경이 큰 로드휠(road wheel)이 있으며 로드암/로드휠 조합과 셋시와의 사이에 스프링과 감쇠기로 구성되는 현가계가 존재한다. 또한 아이들러(idler)와 스프로킷(sprocket)은 지면과의 상호작용이 없는 것으로 가정하고 있다.

이와는 대조적으로 크롤러형 굴삭기 트랙에서는 로드암이 셋시에 고정되어 셋시에 대한 상대운동이 없으며 반경이 상대적으로 작은 로드휠(lower roller)이 저속으로 운동을 한다. 트랙의 장력은 아이들러와 셋시 사이에 있는 리코일 스프링(recoil spring)에 의해 조절되며 아이들러와 스프로킷은 각각 지면과의 상호작용을 통하여 지면으로부터 발생하는 반력을 전달하여 줄 수 있도록 되어있다.

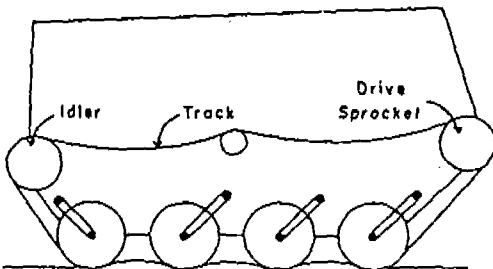


Fig.2 A typical high mobility track vehicle

따라서 위에서 언급한 차이점을 고려하여 Fig. 3과 같은 형태로 굴삭기의 트랙을 모델링하였다. 먼저 아이들러는 셋시와의 사이에 리코일 스프링에 의해 병진운동을 하도록 설계되어 있다. DADS 모델상에서 아이들러를 사용할 경우 아이들러와 지면과의 사이에서 발생하는 반발력을 나타낼 수 없다. 따라서 모델링상에서 아이들러는 로드휠로 대체하였으며 Fig.3과 같이 반경이 큰 로드암에 의해서 회전하도록 하여 셋시와의 상대적인 운동이 직선운동에 가깝도록 하였다.

또한 로드암의 회전강성과 감쇠는 무시하였으며 리코일 스프링의 강성은 아이들러와 하부 프레임 사이에서 병진운동을 하는 스프링요소의 강성으로 대체하였고 감쇠는 수치해석상 안정성을 고려하여 임계감쇠(critical damping)로 가정하였다.

로드휠과 셋시 사이의 상대운동을 구속하기 위하여 로드휠과 셋시 사이에 강성이 큰 스프링을 삽입할 수 있다. 그러나 이 경우 상대적으로 가벼운 로드휠과 큰 스프링 강성에 의하여 높은 주파수 영역의 운동이 발생하게 되어 계산시 적분 시간(integrating time)을 매우 적게 해야 하며 이로 인해 계산시간이 길어지고 계산의 안정성이 저하되는 단점이 있다.

따라서 모델링 상에서는 로드휠의 상대적인 움직임을 제거하기 위하여 모델링 상의 요소 부가를 피하고 계산식 구성시 로드휠의 자유도를 구속하는 방법을 사용하였다. DADS의 사용자 루틴(user subroutine)을 이용하여 로드휠 움직임

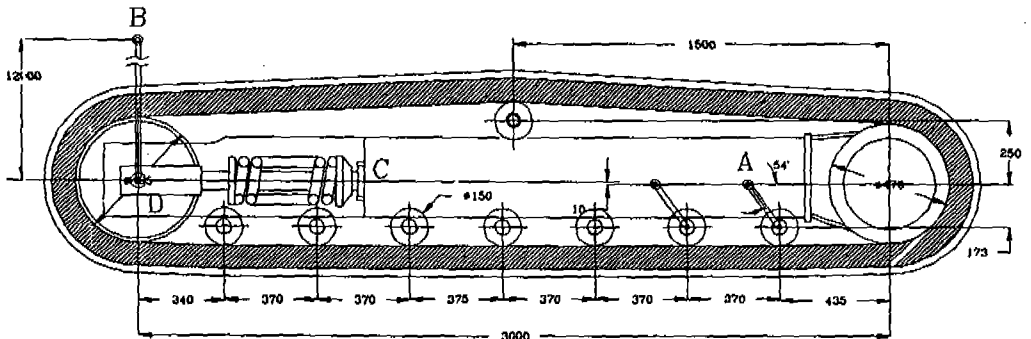


Fig.3 Modeling scheme of under carriage in the crawler type excavator

에 해당되는 자유도를 매 적분구간마다 구속 조건으로 강제 치환하여 로드휠과 샷시 사이에 발생하는 상대적인 운동을 제거하였다.

스프링은 DADS 모델링상에서 구동력을 전달하는 요소로써 모델링 상에서 생략될 수 없기 때문에 로드휠로 대체될 수는 없다. 따라서 지면과의 상호작용을 고려하기 위하여 DADS의 소스 코드(source code)를 수정 하였다.

2.2 구동부의 모델링

굴삭기 모델링에서 구동부는 유압실린더, 상부 회전모터, 그리고 트랙의 주행모터이다.

각각의 구동부는 모두 동역학적인 관점에서 모델링을 하기 위하여 다음과 같은 간단한 제어회로를 구성하였다.

2.2.1 트랙모터의 모델링

DADS에서 트랙요소를 위하여 제공하고 있는 구동방식은 두가지이다. 첫째는 속도를 지정하는 방식으로써 속도를 시간에 대한 함수로 정의하여 주면 지면과 트랙사이의 동역학적인 상호작용에 관계없이 트랙이 고정되어 있는 강체의 구속행렬(Jacobian matrix)에 일정속도의 구속조건으로 작용하게되어 장비는 일정한 속도로 주행하게 된다. 따라서 이는 실제 상황과는 다르게 된다.

둘째는 토크를 시간에 대한 함수로 정의하는

방식으로, 트랙의 구동은 동역학적으로 구동되지 만 장비의 주행속도를 실제상황과 일치하도록 제어하기가 어렵게 된다. 따라서 본 모델링에서는 간단한 제어회로를 구성하여 트랙을 구동하였으며 제어회로는 Fig.4와 같다.

Fig.4의 회로에서 구동신호는 두 가지로 분류 된다. 첫째는 목적하는 장비의 속도와의 관계에서 발생하는 오차 신호이고 두번째는 목적하는 장비의 진행방향과의 관계에서 발생하는 오차신호이다. 이 두 신호를 가감하여 트랙 모터에서는 트랙 모터의 최대출력 한도 내에서 토크를 발생 시키게 된다. Fig.4와 같은 회로를 이용하여 굴삭기는 주행을 위하여 필요한 토크가 트랙 모터의 최대출력 토크보다 작을 경우 장비의 속도를 일정하게 유지하고 반대의 경우는 장비의 주행 속도를 감속하게 된다.

2.2.2 실린더 및 상부 회전 모터의 모델링

유압실린더 및 회전모터의 구동방식은 구동변위 및 각도를 입력하고 시간에 따라 구동변위 및 각도를 만족하기 위한 힘을 발생시키도록 Fig.5와 같은 제어회로를 구성하였다. Fig.5에서 각각의 구동부는 목적하는 변위 및 각도의 시간에 따른 변화와 실제 구동부의 시간에 따른 변화를 비교하여 오차신호를 발생시키고 이 신호에 의하여 각각의 최대출력 한도 내에서 구동력을 발생시키

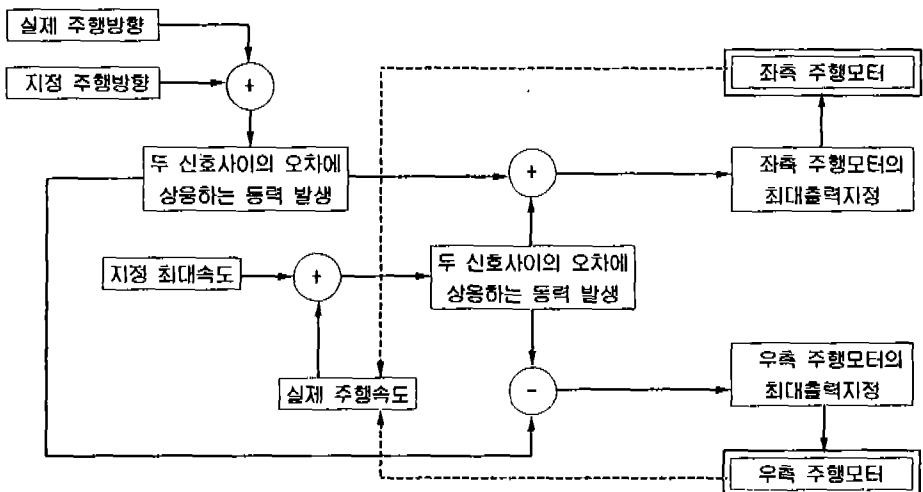


Fig.4 Schematic diagram for track motor control

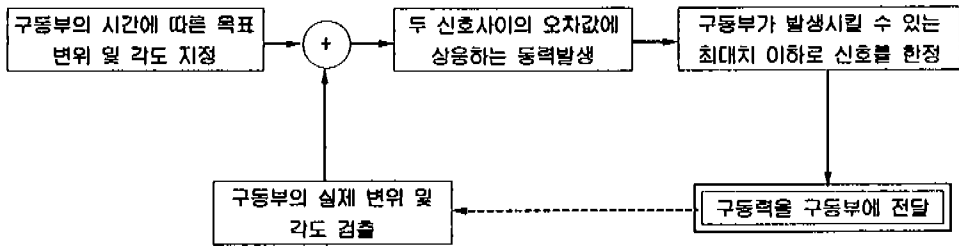


Fig.5 Control logic of swing motor

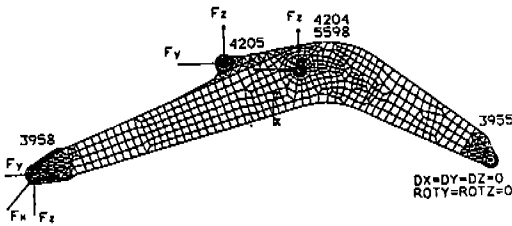


Fig.6 Finite element model of the boom.

Table 1 Natural frequencies of the boom

	Natural Frequency(Hz)
1	0.026
2	9.52
3	40.96
4	54.74
5	118.05
6	144.74
7	156.18

게 된다.

목적하는 변위에 빨리 수렴시키기 위하여 게인 (gain)을 크게 부여하였고 이로 인한 이상진동을 방지하기 위하여 실린더 부위에는 병진 스프링 댐퍼 (translational spring-damper-actuator) 요소를, 회전모터 부위에는 회전 스프링 댐퍼 (rotational spring-damper-actuator) 요소를 지정하고 강성은 0, 그리고 변위가 진동하지 않는 범위내에서 감쇠값을 부여하여 실제의 구동조건에 가깝도록 모델링 하였다.

3. DADS 탄성체 모델링

굴삭기의 정확한 동적해석 및 응력해석을 위해서는 모든 단품을 탄성체로 가정하여 모델링해야 하나 이 경우 자유도의 수가 지나치게 증가하여 계산시간이 많이 소요되는 단점이 있다. 따라서 장비의 동적거동에 큰 영향을 미치는 붐과 상부 프레임만을 탄성체로 모델링하였다.

3.1 붐의 탄성체 모델링

ANSYS를 이용하여 구성한 붐의 유한요소모

델은 Fig.6과 같으며 총 2930개의 결점과 3216 개의 요소로 구성되어 있다. 붐의 고유치 해석을 위해서는 ANSYS상에서 집중질량행렬의 옵션을 사용해야 하며 강제모드는 허용해야 한다. 고유치해석을 위해서는 먼저 경계조건을 선정해야 하는데 붐은 외팔보의 형상을 하고 있으므로 경계 조건으로는 절점 3955에서 세방향 변위와 Y 및 Z에 대한 회전을 구속하였다. 따라서 붐은 X축에 대한 1개의 회전 강제모드를 갖게 된다. Table 1은 붐의 고유진동수를 나타낸 것이며 Fig.7은 붐의 회전에 대한 강제모드를 제외한 처음 3개의 탄성모드를 나타낸 것이다.

실작업시 굴삭기 작업장치는 큰 외력을 받게되며 이 외력은 각 조인트를 통해 단품 및 상부프레임 등으로 전달된다. 따라서 각 조인트에는 큰 반력이 작용하게 되며 이 반력에 의한 조인트 부근의 국부적인 변형을 정확히 묘사하기 위해서는 많은 수의 진동모드를 고려해야 한다. 그러나 많은 수의 진동모드를 고려하면 계산시간이 길어져 수치계산 효율이 떨어지는 단점이 있다. 이런 단점을 피하기 위해 각 조인트에 정적하중을 가한

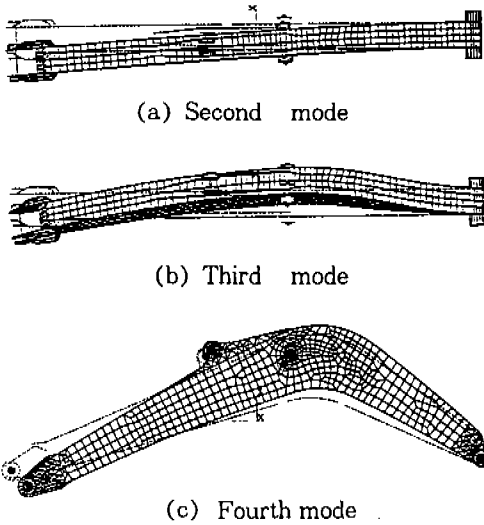


Fig.7 Vibration mode shapes of the boom

후 구한 정적보정모드(static correction mode)를 진동모드와 함께 사용하는 방법이 제안되었다.”

정적보정모드의 선정을 위한 일반적인 기준은 없으나 통상 큰 반력이 작용하는 조인트나 강체요소 또는 스프링-감쇠기로 인해 집중하중이 작용하는 조인트가 정적보정모드를 구하기 위해 외력을 가하는 자유도가 된다.

진동모드해석을 위해 선정된 경계조건이 강체운동모드를 억제하기에 충분하지 않다면 강체운동모드가 발생한다. 진동모드와 함께 정적보정모드를 사용한다면 강체모드로 인하여 정적해석을 수행할 수가 없게 된다. 따라서 이론적으로는 정적해석을 수행할 수가 없으나 외력으로 인한 각 절점에서의 관성력을 보상해 주어 준정적 평형상태(quasi static equilibrium)를 이룬 후 변형모드를 구하는 방법이 제시되었다.^{5,6)}

DADS에서는 강체모드가 있는 경우 정적해석을 위해 IRLVC(inertia relief load vector calculator) 모듈⁶⁾이 있으며 이를 이용하면 강체모드가 있는 경우에도 정적해석을 수행할 수가 있다. 즉 DADS의 IRLVC를 실행하고 나면 ANSYS 정적해석을 수행할 수 있는 명령 파일이 생성되며 이는 단위하중에서 강체운동에 의한 관성력을 제거한 실제 작용하중이다.

봄의 유한요소모델에서는 조인트에 작용하는 정하중에 의한 정적보정모드를 구하기 위한 외력으로 Fig.6의 9개 외력 중에서 봄과 암의 조인트인 절점 3958에 세방향의 단위하중을 가하였다.

3.2 상부프레임의 탄성체 모델

상부프레임의 경우 상부프레임 무게에 비해 상대적으로 무거운 단품들이 상부프레임위에 고정된다. 따라서 상부프레임 단품의 진동모드해석과 함께 기타 단품들의 무게에 의한 효과를 고려하기 위한 정적보정모드를 사용해야 하나 많은 수의 단품의 마운팅 위치를 모두 고려하기 위하여는 그만큼의 정적보정모드를 고려해야 하기 때문에 계산량이 방대해진다. 따라서 상부프레임 단품의 진동모드 해석을 위한 유한요소모델에 단품들을 포함시켜 진동모드해석을 수행하였다. 그러나 동역학적 거동에 관심이 있는 캡(cabin)은 강체모델에서 별도의 바디(body)로 분리하여 고려하였다.

3.3 DADS와 ANSYS간의 모델결합시 유의 사항

ANSYS를 이용한 유한요소모델링시 DADS와 결합을 고려하여 다음과 같은 사항에 미리 유의해야 한다.

- ① DADS에서 설정한 국부좌표계와 ANSYS 모델에서 사용한 좌표계는 일치해야 한다. 만약 일치하지 않으면 ANSYS 좌표계를 이동하여 DADS 좌표계와 일치하게 해야 한다.
- ② DADS를 이용한 강체모델과 ANSYS를 이용한 유한요소모델의 결합을 위해서는 DADS상의 조인트 위치에 ANSYS 절점이 존재해야 한다. ANSYS의 3차원 모델링시 셸(shell) 요소 등을 사용하면 절점의 위치가 다소 이동하여 DADS의 조인트 위치에 ANSYS 절점이 존재하지 않을 수가 있으며 이런 경우 DADS에서 결합시 오차가 발생한다. 따라서 유한요소모델링이 끝난 후 DADS의 조인트 위치에 ANSYS 절점이 있는지 검토한 후 유한요소해석을 수

행해야 한다. 만약 DADS 조인트 위치에 ANSYS 절점이 존재하지 않으면 절점의 위치를 이동하여 DADS 조인트의 좌표와 일치하게 해야 한다.

4. 동적 시뮬레이션

4.1 주행 시뮬레이션

굴삭기의 주행시 각 부분에서의 동적 거동을 고찰하기 위하여 일정한 간격으로 놓여진 범프위를 장비가 주행할 때 장비의 각 부분에서의 동적 거동을 고찰하였다. 모델링 상에서는 주행시 장비의 동적거동에 큰 영향을 미치는 상부프레임의 탄성만을 고려하였으며 상부프레임에 장착되는 단품들은 해석의 효율성을 위하여 유한요소모델의 모드해석시 집중질량으로 처리하였고 상부프레임에서는 5개의 모드를 고려하였다.

Fig.8 및 9는 험지 주행시 상부프레임 및 캡의 주파특성을 나타낸 것이다. Fig.8은 카운터웨이트 하단 장착부에서의 상하방향 가속도의 주파수특성을 나타낸 것으로 상부프레임의 굽힘모드(bending mode) 고유진동수가 5Hz 근방에 있음을 보여준다. 또한 Fig.9는 캡 좌측 상단 좌우방향의 주파수 특성을 나타낸 것으로 캡의 롤링모드(rolling mode)가 9.5Hz임을 보여준다.

하부 롤러의 내구성 평가를 위해서는 하부롤러에 작용하는 반력을 구해야 한다. Fig.10은 두번째(실선) 및 7번째 하부롤러(일점쇄선)에 작용하는 반력을 나타낸 것으로 범프를 지날 때마다 반력이 매우 급격히 증가하는 것을 볼 수 있다. 각각의 로드휠에 작용하는 정적인 반력은 카운트웨이트의 영향으로 인해 아이들러 쪽에는 적은 반력이 작용하며 스프로킷으로 갈수록 큰 반력이 작용하게 된다. 그러나 범프 주행시 작용하는 최대 동하중은 로드휠에 따른 차이가 크지 않으며 동하중계수는 거의 일정한 것으로 나타났다.

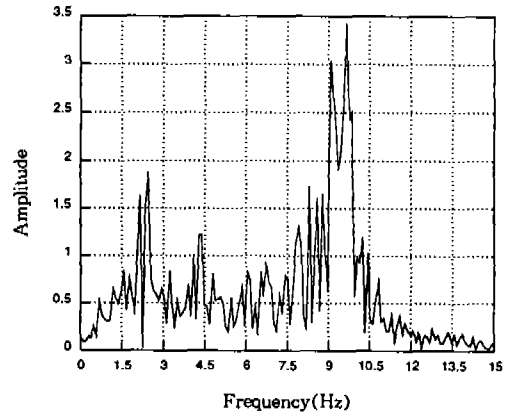


Fig.9 Frequency domain characteristics of the cabin.

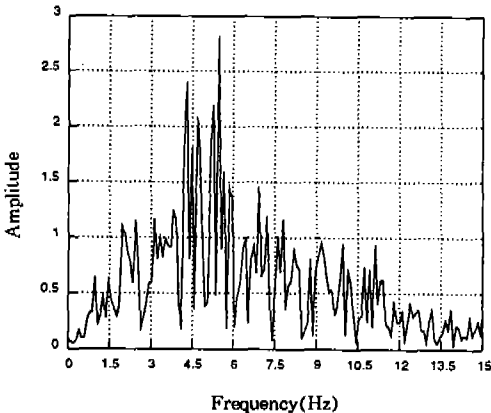


Fig.8 Frequency domain characteristics of the upper frame.

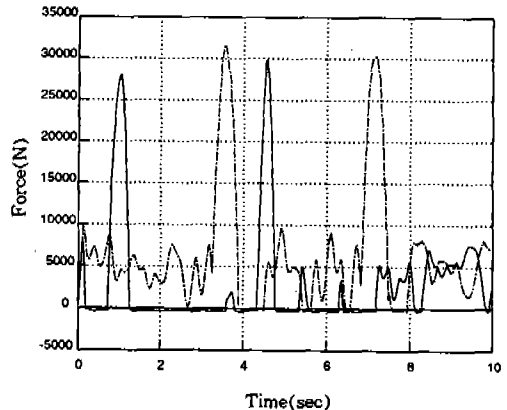


Fig.10 Reaction forces acting on the lower rollers.

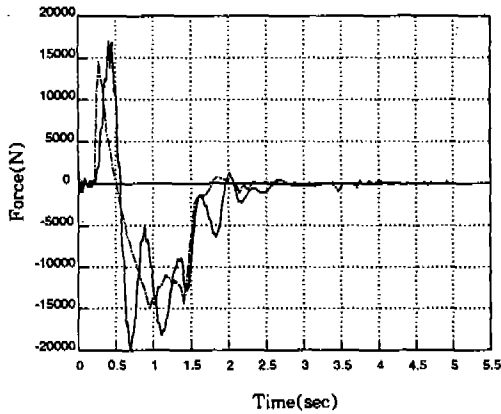


Fig.11 Reaction forces at the boom-arm joint.

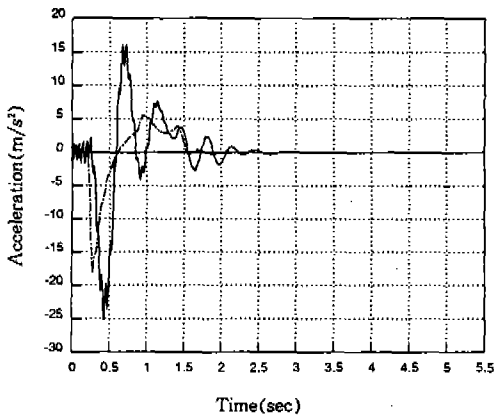


Fig.12 Accelerations at the boom-arm joint.

4.2 상부프레임의 선회시 응답

굴삭기는 굴삭작업후 상차 및 기타작업을 하기 위해 상부프레임을 선회하는 경우가 많으며 이때 버킷에 많은 중량이 실린 상태에서 선회후 급정지하면 관성력으로 인해 작업장치 조인트부분에 큰 반력이 작용하게 되며 작업장치에도 큰 응력이 작용한다. 상부 선회시에는 붐을 탄성체로 가정하였으며 Fig.11 및 12는 선회시 붐과 암의 조인트에 작용하는 반력과 가속도를 나타낸 것이다.

붐에서는 4개의 진동모드와 세개의 정적보정 모드를 고려하였다. Fig.11에서 일점쇄선은 강체

모델의 결과를 나타낸 것이며 실선은 붐의 탄성 효과를 고려한 경우의 결과를 나타낸 것이다. Fig.11과 12에서 강체모델의 결과와 비교하면 붐의 탄성효과를 고려한 경우 반력 및 가속도의 차이가 현저한 것을 볼 수 있다. 즉 단품의 탄성 효과가 조인트의 반력에 미치는 효과가 매우 큰 것을 볼 수 있다.

5. 결 론

동역학해석 소프트웨어인 DADS와 유한요소 해석 소프트웨어인 ANSYS를 이용하여 크롤러형 굴삭기의 트랙을 포함한 전체 동역학적 모델을 개발하였다. 주행 시뮬레이션을 통해 상부프레임 및 캡의 진동특성을 예측할 수 있었으며 또한 캡 및 트랙롤러의 피로수명 평가를 위한 동하중을 얻을 수 있었다. 개발된 모델은 유압 및 연료탱크, 머플러 등 단품의 진동내구성 시험을 위한 시험조건인 가진주파수 및 진폭 결정에 활용할 수 있었다. 선회시 붐의 탄성효과를 고려하여 각각의 조인트에 작용하는 반력을 예측하였으며 이를 통해 작업장치에 작용하는 응력의 시간이력을 예측할 수 있었다. 그러나 주행 시뮬레이션에서는 장비의 주행특성이 토양의 물성치에 매우 민감하게 반응하므로 이들을 정량화하기 위한 연구가 필요하다고 생각된다.

참 고 문 헌

1. Track Vehicle Superlement User's Manual, Computer Aided Design Software, Inc., Coralville, Iowa.
2. M. K. McCullough and E. J. Haug, "Terradynamics of Mobility Track Vehicles", Technical Report, Center for Computer Aided Design, The University of Iowa, Iowa City, Iowa, 1985
3. M. Bamford, "An Introduction to Tracked Vehicle Modeling Using the DADS Track Superlement", Computer Aided Design Software, Inc., Iowa.

4. W. S. Yoo and E. J. Haug, "Dynamics of Flexible Mechanical System Using Vibration and Static Correction Modes", *J. of Mechanisms, Transmissions, and Automation in Design*, Vol. 108, No. 9, pp. 315~322, 1986.
5. J. Ryu, S. S. Kim, and S. S. Kim, "An Efficient Method of Distributing Inertia Loads for Quasi-Static Analysis in Dynamic Stress Computation", Technical Report, Center for Simulation and Design Optimization of Mechanical Systems, The University of Iowa, 1990.
6. S. H. Shin, W. S. Yoo, and J. Tang, "Theoretical Development and Computer Implementation of the DADS Intermediate Processor", Technical Report No. R-135, Center for Simulation and Design Optimization, The University of Iowa, 1992.