

(論 文)

굴삭기의 3차원 모델링 및 역동역학 해석

김외조* · 유완석** · 이병훈** · 이만형** · 윤경화***

(1993년 3월 4일 접수)

Three Dimensional Modeling and Inverse Dynamic Analysis of An Excavator

Oe-Jo Kim, Wan-Suk Yoo, Byung-Hoon Lee, Man-Hyung Lee and Kyeong-Hwa Yoon

Key Words : Excavator(굴삭기), Multibody Dynamics(다물체 동역학), Inverse Dynamic(역동역학), Boom(부움), Arm(아암), Bucket(버켓), Cylinder(실린더)

Abstract

This paper presents a three dimensional modeling and dynamic analysis of a hydraulic excavator. An excavator composed of a boom, an arm, a bucket, two boom cylinders, an arm cylinder, and a bucket cylinder is used for the analysis. Each cylinder is modeled to two separate bodies linked by a translational joint. Judging from the actual degrees of freedom of the excavator, proper kinematic joints are selected to exclude redundant constraints in the modeling. In order to find the reaction forces at kinematic joints during operations, inverse dynamic analysis is carried out. Dynamic analysis is also carried out to verify the results from inverse dynamic analysis. The DADS program is used for analysis, with proper modification of the DADS user routine according to various motions.

1. 서 론

컴퓨터를 사용하기 전의 동역학 연구분야에서는 하나의 강체에 대한 해석이나 질점계에 대한 해석만을 주로 다루었으나, 1960년대부터 우주항공분야의 개척과 더불어 여러개의 물체로 이루어진 계에 대한 다물체 동역학(multibody dynamics)분야의 연구가 시작되었다.⁽¹⁾ 이러한 다물체 동역학분야는 현재 크게 우주항공분야, 기계 및 기구분야, 로봇분야 등 3개의 분야로 나누어 연구가 진행되고 있다.⁽²⁾

컴퓨터의 이용과 발전에 따라 다물체 동역학에 사용되는 여러 프로그램들이 개발되었는데, 이러한 프로그램에는 특수한 문제에만 사용할 수 있는 특수 프로그램과, 일반적인 경우에 고루 사용할 수 있는 범용 프로그램으로 발전되었다. 70년대 이후로 개발된 대표적인 범용 프로그램으로는 DADS,⁽³⁾ ADAMS,⁽⁴⁾ MEDYNA⁽⁵⁾ 등이 있다. 본 연구에서는 DADS 프로그램을 이용하여 건설 중장비인 굴삭기를 3차원으로 모델링하고 역동역학 해석을 수행하였다. 굴삭기를 프레임(frame), 부움(boom), 아암(arm), 버켓(bucket), 커넥팅 로드(connecting rod), 요오크(yoke) 및 유압 실린더들로 구성된 계(system)로 모델링하고, 각 부품들은 강체로 가정하였다. 굴삭하여 덤프하는 운동을 해석하여

*부산대학교 생산기계공학과 대학원

**정회원, 부산대학교 기계기술연구소

***삼성중공업 종합기술연구소 연구개발 1실

각 실린더에 작용하는 힘과 각 조인트에서 생겨나는 반력을 구하였으며, 외부에서의 굴삭력에 의한 각 실린더의 반력의 변화를 고찰하였다. 굴삭력을 고려할 때에는 DADS의 사용자 정의 프로그램을 운동에 맞도록 보완하여 사용하였다.

2. 굴삭기의 3차원 모델링

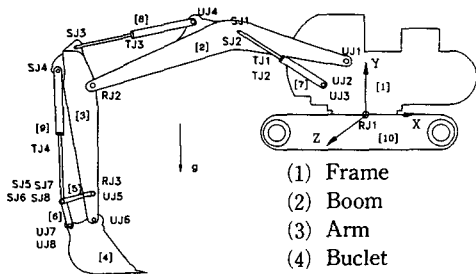
굴삭기 전체 시스템 구성은 Fig. 1과 같이 프레임, 부움, 아암, 버켓, 요오크, 커넥팅 로드, 및 부움 실린더, 아암 실린더, 및 버켓 실린더로 구성된다. 요오크, 커넥팅 로드, 및 부움 실린더는 좌우 1개씩 각각 2개 있으며, 각 실린더는 2개의 물체가 병진조인트(translational joint)로 연결되어 있는 것으로 모델링하였다. 하부차체와 지면(ground)과의 상대운동이 없는 것으로 가정하여, 하부차체를 지면으로 생각하였다. 전체 시스템은 지면을 포함시켜 17개의 물체로 구성하였으며, 각 물체의 무게중심의 위치는 Fig. 1과 같은 형태로부터 측정하였다.

2차원으로 모델링하는 경우에는 각 연결부를 회전조인트(revolute joint)로 선정하면 되지만, 3차원 모델링에서는 각 조인트를 회전조인트로 설정할 경우 잉여구속식(redundant constraint equations)이 발생한다. 역동역학(inverse dynamic) 해석을 위해서는 잉여구속 조건이 없어야 하므로, 본 연구에서는 굴삭기의 실제 움직임을 고려하여 자유도를 선정하였다. 또한, 선정된 자유도에 맞도록 다음과 같은 방법으로 조인트를 선정하여 잉여구속식이 생

기지 않도록 하였다.

2.2 조인트의 선정

조인트 선정의 편의를 위하여, 먼저 전체 시스템을 프레임과 부움, 부움과 아암, 및 아암과 버켓의 세 부분으로 나누어 생각한다. 프레임과 부움이 연결되어 있는 부분을 Fig. 2와 같이 물체수가 6개인 계로 생각한다. 프레임을 고정시키고, 좌우 2개의 부움 실린더마다 병진 조인트를 설정하고, 나머지 조인트는 회전 조인트로 모델링 하면서, 부움 실린더의 구동조건식 2개를 고려하면 계의 자유도 수는 -7이 된다. 7개의 잉여구속 조건을 줄여서 자유도가 0(zero)이 되도록 하기 위해 회전 조인트들을 다음과 같이 다른 조인트로 바꿔 나간다. 각각의 부움 실린더 양단을 유니버설 조인트(universal joint)와 구면 조인트(spherical joint)의 조합으로 모델링하여, 부움 실린더의 축(axial) 방향의 회전 운동을 구속하면서 6개의 잉여구속식을 줄였다. 다음으로, 부움과 프레임을 유니버설 조인트로 연결하여 나머지 1개의 잉여구속식을 제거하여, 실린더의 구동조건식을 고려할 때 자유도가 0인 시스템으로 만들었다. 이러한 조인트들로 이루어진 부움



- RJ* : Revolute Joint*
- UJ* : Universal Joint*
- SJ* : Spherical Joint*
- TJ* : Translational Joint*
- (1) Frame
- (2) Boom
- (3) Arm
- (4) Bucket
- (5) Yoke
- (6) Connecting-Rod
- (7) Boom Cylinder
- (8) Arm Cylinder
- (9) Bucket Cylinder
- (10) Guard

Fig. 1 Configuration of an excavator

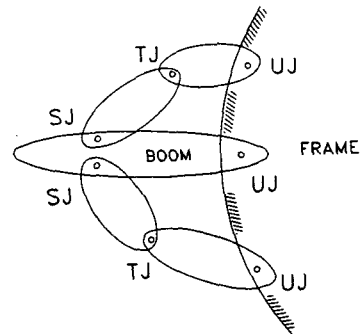


Fig. 2 Joint selection among frame, boom and boom cylinder

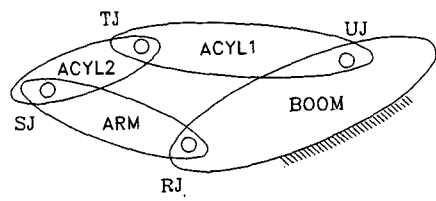


Fig. 3 Joint selection among boom, arm, and arm cylinder

은 부움 실린더의 길이 변화에 따라 상승과 하강을 하는 운동을 하게 된다. 조인트의 종류에 따른 구속조건식의 숫자 및 구속식의 수학적인 표현은 참고문헌(6)에 잘 설명되어 있다.

다음으로 Fig. 3과 같이 부움, 아암 및 아암 실린더로 이루어진 계를 생각한다. 부움을 고정시키고, 아암 실린더에는 병진 조인트, 나머지 각 조인트를 회전 조인트로 모델링하면서 아암 실린더의 구동조건식 1개를 고려하면 자유도수는 -3이 된다. 아암 실린더 양단을 유니버설 조인트와 구면 조인트로 바꾸어서 3개의 잉여구속식을 제거하였다. 이렇게 조인트를 선정하면 아암은 아암 실린더의 길이 변화에 따라 아암이 접히고 펼쳐지는 회전 운동만 하게 된다.

다음으로 Fig. 4와 같이 아암, 버켓, 및 링크부로 이루어진 계를 생각한다. 아암을 고정시키고, 버켓 실린더에는 병진 조인트, 나머지 조인트들은 회전 조인트로 모델링하면서, 버켓 실린더의 구동조건식 1개를 고려하면 전체 자유도 수는 -14가 된다. 잉여구속식을 줄이기 위해 두 커넥팅 로드 양단을 유니버설 조인트와 구면 조인트의 조합으로 모델링하여 6개의 잉여구속식을 줄였다. 다음으로 버켓 실린더와 아암과의 연결을 구면 조인트로, 아암과 버켓의 연결을 유니버설 조인트로 바꿈으로써 3개의 잉여조건식을 제거하였다. 다음으로, 두 개의 요오크 중 요오크 1의 양단은 구면 조인트와 회전 조인트로 바꾸고, 요오크 2는 구면 조인트와 유니버설 조인트로 연결하여 5개의 잉여구속식을 추가로 제거하였다. 이렇게 조인트를 선정하면 버켓 실린더의 구동에 따라 아암과 버켓 사이의 회전운동만 가능하게 된다.

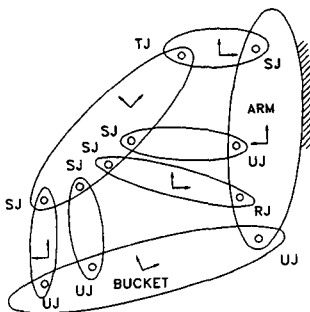


Fig. 4 Joint selection among arm, bucket and linkages

앞에서 모델링한 세부분을 조합하여 전체 시스템을 구성하고 프레임이 선회하기 위한 구동조건식을 고려하면, 굴삭기 전체 시스템의 자유도수가 깎이 되어 역동역학 해석을 수행할 수 있다. 선정된 각 조인트들을 Fig. 1에 나타내었다.

2.2 각 부품의 모델링

굴삭기의 프레임과 아암을 연결시키는 부움은 Fig. 5와 같이 유니버설 조인트 UJ1으로 프레임과 연결되고, 회전 조인트 RJ2로 아암과 연결되며, 구동력 전달을 위한 부움 실린더와는 구면 조인트 SJ1, SJ2로 연결되어 있다. 부움의 위치와 자세를 기술하기 위한 국부좌표계(local coordinate system)는 부움의 무게중심에 설정하고, 조인트 RJ2과 UJ1를 연결하는 직선에 평행하게 국부좌표계 x축을 설정하였다. 또한 국부좌표계의 z축은 관성좌표계(inertial coordinate system)의 Z축과 평행하도록 설정하였으며, 다른 부품의 경우에서도 국부좌표계의 z축은 관성좌표계의 Z축과 동일하게 설정하였다.

프레임과 하부차체를 연결하는 회전 조인트에 설정된 관성좌표계에 대한 부움 국부좌표계의 원점의 위치는 Fig. 1의 상태에서부터 측정하여 (-4.1, 1.3, 0.0 m)로 입력하였다. 질량(2366 kg) 및 관성모멘트($I_{xx}=618.6$, $I_{yy}=9218.9$, $I_{zz}=9621.6$, $I_{xy}=295.5$, $I_{xz}=-0.7$, $I_{yz}=0.4$ kg.m²)는 설계자료의 유한요소모델로부터 얻어진 값을 사용하였으며, 나머지 부품들의 질량 및 모우멘트는 참고문헌(7)에 수록되어 있다.

아암은 Fig. 6에 나타난 바와 같이 부움과는 회전 조인트 RJ2로 연결되고, 요오크 1과는 회전조

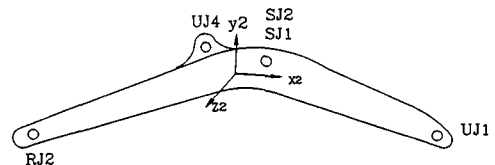


Fig. 5 Modeling of the boom

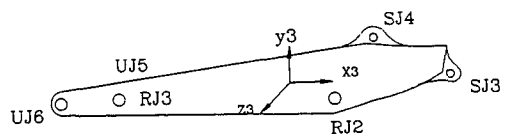


Fig. 6 Modeling of the arm

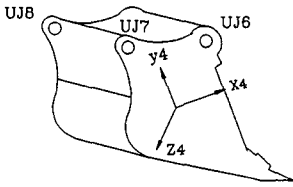


Fig. 7 Modeling of the bucket

인트 RJ3로, 요오크 2와는 유니버설 조인트 UJ5로, 버켈과는 유니버설 조인트 UJ6로 각각 연결되어 있다. 아암의 위치와 자세를 나타내는 국부좌표계는 아암의 무게중심에 설정하고, 조인트 UJ6과 RJ2를 연결하는 직선에 평행하게 국부좌표계의 x축을 설정하여 관성좌표계에 대한 자세를 표현하였다. 국부좌표계의 원점의 위치, 아암의 질량, 및 관성모우멘트는 참고문헌(7)에 수록하였다.

버켈은 Fig. 7과 같은 유니버설 조인트 UJ6로 아암과 연결되고, 커넥팅 로드 1과 커넥팅 로드 2는 각각 유니버설 조인트 UJ7, UJ8로 연결된다. 버켈의 국부좌표계는 버켈의 무게중심에 원점을 설정하고, 조인트 UJ6와 버켈의 끝단을 연결하는 직선과 수직되게 국부좌표계 x축을 설정하였다. 무하중 시의 버켈 질량과 관성 모우멘트는 참고문헌(7)에 있다.

요오크와 커넥팅 로드는 단면적인 일정한 막대기로 모델링 하였으며, 국부좌표계 위치는 각각의 무게중심에 설정하였으며, 길이방향으로 국부좌표계 x축을 설정하여 관성좌표계에 대한 자세를 표현하였다.

굴삭기의 구동 실린더부는 부옴 실린더 2개, 아암 실린더 1개, 버켈 실린더 1개로 구성되어 있다. 각 실린더를 두 개의 물체로 모델링하고 두 물체를 병진 조인트로 연결시켰으며, 각 물체는 단면이 원형인 막대모양으로 생각하였다. 국부좌표계 x축은 두 조인트를 연결하는 직선과 동일하게 설정하였으며, 각 실린더의 질량 및 관성 모우멘트는 참고문헌(7)에 있다.

3. 운동방정식 및 해법

3.1 다물체계의 역동역학 해석

외부로부터 가해지는 힘에 의한 물체의 운동을 해석하는 것이 동역학 해석이고, 원하는 운동을 만들어 내는데 필요한 힘을 구하는 것이 역동역학 해

석이다. 따라서 역동역학 해석을 위해서는 운동을 표시하는 조건식이 필요한데, 이러한 구속조건식을 구동조건식(driving constraint equation)이라고 하며 본 연구에서는 $\Phi^D(q, t)$ 로 표시한다.

기계 시스템에서 생기는 구속조건에는 구동조건식 외에도 물체를 연결하는 조인트에서 생기는 기구학적 구속조건식(kinematic constraint equations) $\Phi^K(q)$ 이 있으며, 공간운동에서 회전을 표시하는 좌표로 오일러 매개변수를 사용하는 경우에는 오일러 매개변수 구속조건식(euler parameter constraint)이 있으며, 물체 i 에 대한 오일러 매개변수 구속조건식은 다음과 같이 정의된다.⁽⁶⁾

$$\Phi_i^P = P_i^T P_i - 1 = 0 \tag{1}$$

여기서 P_i 는 물체 i 의 오일러 매개변수이다.

기구학적 구속식, 구동조건식, 오일러 매개변수 구속조건식을 포함하는 계 전체의 구속조건식은

$$\hat{\Phi}(q, t) = \begin{bmatrix} \Phi^K(q) \\ \Phi^D(q, t) \\ \Phi^P(q) \end{bmatrix} = 0 \tag{2}$$

로 표시되며, 이때 $\Phi^K(q)$, $\Phi^D(q, t)$, $\Phi^P(q)$ 는 서로 독립적이어야 한다.

식(2)를 시간에 대해 미분한 속도방정식은

$$\hat{\Phi}_p \dot{q} = -\hat{\Phi}_t \tag{3}$$

로 주어진다. 여기서 $\hat{\Phi}_q$ 는 구속방정식 $\hat{\Phi}(q, t)$ 를 좌표 q 로 편미분한 자코비안 행렬이며, $\hat{\Phi}_t$ 는 구속방정식의 시간에 편미분을 의미한다.

역동역학 해석에서는 계의 자유도 만큼 구동조건식이 주어지므로, 계 전체의 구속조건식의 수가 전체 좌표수와 같게 된다. 따라서 식(3)에서의 자코비안 행렬은 정방행렬(square matrix)이 된다.

위의 식(3)을 시간에 대해 미분한 가속도방정식은

$$\hat{\Phi}_q \ddot{q} = -(\hat{\Phi}_q \dot{q})_q \dot{q} - 2\hat{\Phi}_{qt} \dot{q} - \hat{\Phi}_{tt} = \hat{\gamma} \tag{4}$$

로 주어진다.

구속조건식의 처리를 위해 라그랑지곱수(Lagrange multiplier)를 도입하고 역동역학 시스템의 운동방정식을 기술하면 다음과 같다.⁽⁶⁾

$$M\ddot{q} + \hat{\Phi}_q^T \hat{\lambda} = \hat{Q}_A \tag{5}$$

$$\hat{\Phi}_q^T \ddot{q} = \hat{\gamma} \tag{6}$$

여기서 \hat{Q}_A 는 외력이다.

자유도가 높으므로 식(6)으로부터 \ddot{q} 가 구해진다. 구해진 \ddot{q} 를 식(5)에 대입하면 조인트의 반력 $\Phi_q^T \lambda$ 를 구할 수 있다.

3.2 동역학 해석

식(2)에서 구동조건식 $\Phi^D(q, t)$ 의 일부 또는 전부를 없애면, 구속조건식의 수는 좌표의 수보다 적게 되며, 전체 시스템의 자유도가陽의 값을 갖게 된다. 이 때의 구속조건식을

$$\Phi(q, t) = \begin{bmatrix} \Phi^K(q) \\ \Phi^P(q) \end{bmatrix} = 0 \quad (7)$$

라고 두면, 식(7)를 미분하여 속도관계식을 구할 수 있다.

$$\Phi_q \dot{q} = -\dot{\Phi} \quad (8)$$

식(8)을 시간에 대해 미분하여 식(9)를 얻고, 이와 같은 구속식을 갖는 시스템의 운동방정식을 식(10)과 같이 유도할 수 있다.⁽⁶⁾

$$\Phi_q \ddot{q} = -(\Phi_q \dot{q})_q \dot{q} - 2\Phi_{qt} \dot{q} - \Phi_{tt} = \gamma \quad (9)$$

$$\begin{bmatrix} M & \Phi_q^T \\ \Phi_q & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{q} \\ \gamma \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_A \\ \gamma \end{bmatrix} \quad (10)$$

여기서 γ 는 라그랑지곱수이며, Q_A 는 일반력 벡터이다. 동역학 해석에서는 식(10)을 풀어서 가속도를 구하고, 이를 적분하여 속도와 위치를 구한다.

4. 운동의 해석 및 수치예제

4.1 굴삭 및 덤프운동의 해석

굴삭하여 덤프시키는 운동을 해석하기 위해 굴삭

기를 최대위치로 들어올렸다가 아래로 내려오면서 굴삭하고, 굴삭한 뒤 덤프할 위치로 180° 회전하여 덤프하는 운동을 해석하였다. 굴삭력은 고려하지 않았으며, 굴삭과 덤프작업에 따른 버켈의 중량증가나 감소를 무시하였다. 운동을 만들어 내기 위한 구동조건으로 각 실린더의 시간에 따른 길이를 Table 1과 같이 변화시키고, 선회에 따른 구동조건도 추가하여 시스템의 자유도를 零으로 만든 후, 역동역학 해석을 수행하였다. 각 실린더의 길이는 각 시간 구간마다 3차 스플라인(spline) 곡선으로 정의하였으며, 역동역학 해석의 결과를 Fig. 8~Fig. 12에 나타내었다.

Table 1의 운동을 만들기 위해 각 실린더에 필요한 힘을 보면(Fig. 8) 부움 실린더에 작용하는 힘이 가장 큰 변화를 보이고 있는데, 이는 부움 실린더에 작용하는 힘에 의해 작업부 전체가 움직이고 있기 때문이다. 초기위치에서 최고위치로 이동함에 따라 부움 실린더에 작용하는 힘의 방향이 변하는 것을 볼 수 있는데, 이는 처음에는 실린더를 밀어 올리는 힘이 필요하다가, 최고위치에 도달하기 직전부터 실린더를 밀어 올리는 힘이 필요함을 뜻한다. 최고위치에서 내리는 구간에는 잠시동안 끌어 당기다가 그 이후에는 陽의 힘으로 버티고 있는 것을 알 수 있다.

선회하는 구간에서는 부움 실린더에 작용하는 힘에 큰 변화가 없으며, 그림에서의 부움 실린더 힘은 좌우 두 개의 부움 실린더 힘을 합한 값이다.

아암 실린더와 버켈 실린더에 작용하는 힘은 부움 실린더의 값에 비해 상당히 작으며, 최고의 위치로 움직였을 때 힘의 부호가 부움 실린더와 반대이다. 이는 최고의 위치로 움직이기 위해서 부움실

Table 1 Distance of each cylinder versus time

Time (sec)	Boom cylinder (m)	Arm cylinder (m)	Bucket cylinder (m)	Comparison of operation
0.0	2.75	3.12	2.46	Initial position
3.4	3.64	2.40	1.90	Maximum height
5.32	2.16	2.56	2.46	Lowest position
10.6	2.16	2.56	2.78	End of digging
15.7	2.90	2.40	2.78	Turn for dumping
18.9	2.90	2.40	1.90	Dumping operation

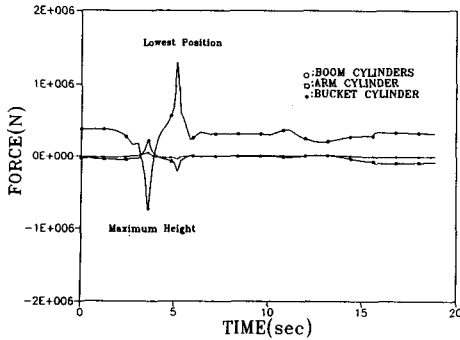


Fig. 8 Cylinder forces (digging & dumping)

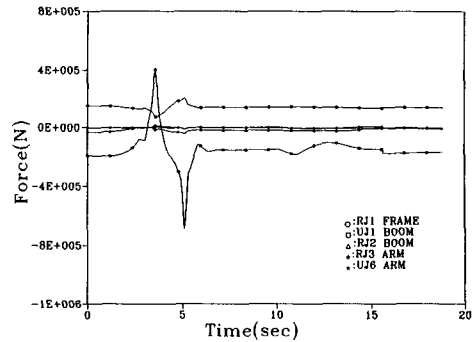


Fig. 10 Joint reaction forces along local y direction (digging & dumping)

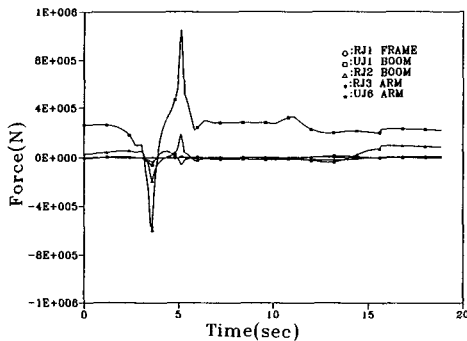


Fig. 9 Joint reaction forces along local x direction (digging & dumping)

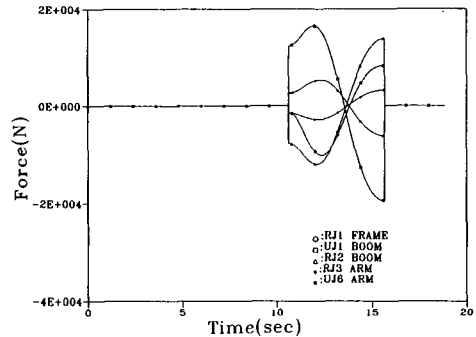


Fig. 11 Joint reaction forces along local z direction (digging & dumping)

린더는 밀어야 하지만, 아암 실린더와 버킷 실린더는 당겨져야 하기 때문이라 사료된다.

여러 조인트에 작용하는 국부좌표계 x 축 방향의 반력을 Fig. 9에 나타내었으며, Fig. 10와 Fig. 11에 y 축과 z 축의 반력을 표시하였다. Fig. 9~Fig. 11에서 볼 수 있듯이, 굴삭하여 덤프시키는 작업에서 조인트 UJ1에서 반력의 변화가 가장 큰 것을 알 수 있는데, 이는 조인트 UJ1에서 가장 큰 하중을 지지하고 있기 때문이다.

Fig. 9에서 RJ1 FRAME은 프레임의 국부좌표계에서 측정된 회전 조인트 RJ1의 반력의 크기를 나타내며, 다른 조인트에서도 같은 방법으로 표시하였다. x 축 방향의 반력을 비교해 보면(Fig. 9), 조인트 UJ1에서는 최고높이로 이동하는 3.4초까지 반력이 줄어드는 것을 볼 수 있는데, 이는 최고높이로 움직이기 위하여 부움을 들어 세울 때 작업부 전체의 무게중심 위치가 관성좌표계에서 X 축의 양의 방향으로 이동하기 때문이다. 이후 최저위치로

움직임에 따라 반력이 커지다가, 최저위치(5.3초)에서 최대값을 갖는다. 이후 굴삭작업을 수행하는 부분에서는 반력의 변화는 거의 발생하지 않는다. x 축 방향의 반력변화가 실린더에서의 반력변화(Fig. 8)와 비슷한 경향을 보이고 있는데, 이는 조인트의 반력이 물체의 자중보다도 실린더의 힘에 좌우되기 때문이라 사료된다.

y 축 방향의 반력(Fig. 10)을 비교해 보면 조인트 UJ1에서는 최고높이로 이동하는 3.4초까지 반력이 증가함을 알 수 있는데, 이는 작업부 전체의 무게중심이 관성좌표계 Y 축의 양의 방향으로 이동하기 때문이다. 이후 최저위치 부근에서 최대값을 갖는다.

z 축 방향의 반력(Fig. 11)은 10.6초에서부터 15.7초까지 덤프할 위치로 이동할 때, 프레임이 선회하는 작업이 추가됨에 따라 Z 축 방향으로 반력이 발생한다. 조인트 RJ2와 조인트 UJ1에서 가장 큰 반력이 생기며, 선회를 멈추는 부분에서 가장 큰

반력이 나타난다. 반력의 방향은 선회할 때 조인트 UJ1과 조인트 UJ6는 양의 값을, 나머지 조인트는 음의 반력을 갖는다.

조인트 RJ1의 Z축 방향 토크의 크기를 비교한 Fig. 12를 보면 최고위치로 들어올렸을 때 음의 최대값 갖는데, 이는 조인트 RJ1에서 전체하중이 작용되기 때문에 관성좌표계 Z축 방향의 큰 토크가 발생하며, 최저위치로 내렸을 때 거의 소멸됨을 볼 수 있다.

4.2 굴삭력에 의한 반력계산

굴삭작업을 하는 동안 버켓의 끝단에 굴삭력이 주어질 때 각 실린더의 반력계산을 위해 다음과 같은 시뮬레이션을 수행하였다. 버켓의 굴삭력은 Fig. 13과 같은 형태로 최대 굴삭력이 25000 N이 되도록 부여하였으며, 굴삭력 작용점은 버켓 끝단의 중앙에서 국부좌표계 z축 방향으로 0.1 m 벗어난 위치로 설정했다. Fig. 13과 같은 굴삭력이 버켓의 끝단에 작용되도록 DADS 프로그램의 사용자 정의 프로그램을 수정하였다. 버켓 끝단의 힘을 읽어 드린후 버켓의 중심 주위로 힘과 모멘트로 변환하여 입력시켰다.

이때 프레임은 선회하지 않도록 고정시켰으며, 부움 실린더와 아암 실린더의 길이도 각각 2.75 m, 3.13 m로 고정시켰다. 버켓 실린더의 길이는 2.46 m(0.0초)에서 1.90 m(3.4초)로 줄였다가 2.78 m(10.6초)까지 늘이는 형태로 변화시켰다.

역동역학 해석의 결과로 얻어진 각 실린더에 작용하는 힘의 크기를 Fig. 14에 나타내었다. 굴삭력의 작용에 의한 각 실린더 힘의 크기는 아암 실린더에서 변화가 가장 큰 것으로 나타났다. 이는 아

암 실린더에서 조인트 RJ2 주위의 굴삭력에 의한 모멘트의 크기가 버켓 실린더와 부움 실린더에 비해 상대적으로 크게 작용하기 때문이라고 사료된다. 또한 시간이 어느 정도 경과하면 아암 실린더의 반력이 버켓 실린더보다 작아지는데, 이는 버켓이 오무려짐에 따라 아암 실린더에서는 굴삭력의 효과가 감소되나 버켓 실린더에서는 감소되지 않기 때문이라 생각된다.

4.3 역동역학 해석과 동역학 해석의 비교

앞절에서 구한 역동역학 해석의 결과를 확인하기

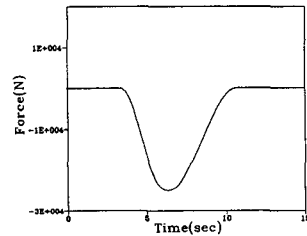


Fig. 13 Configuration of digging force

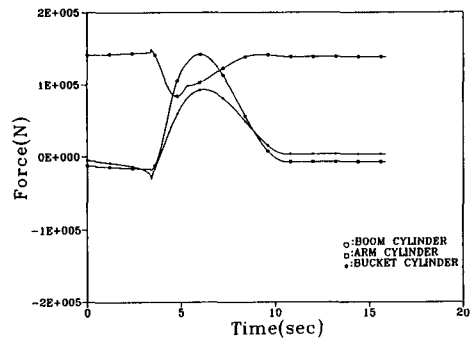


Fig. 14 Cylinder forces (digging force)

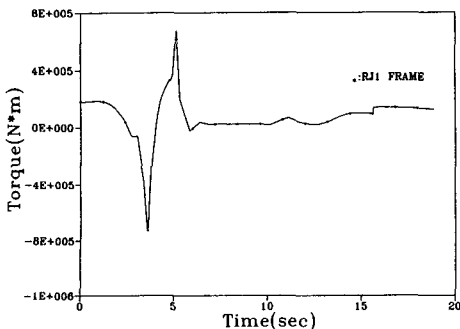


Fig. 12 Joint reaction torque about local z direction (digging & dumping)

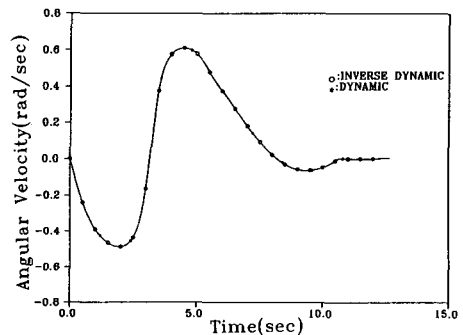


Fig. 15 Angular velocity of bucket

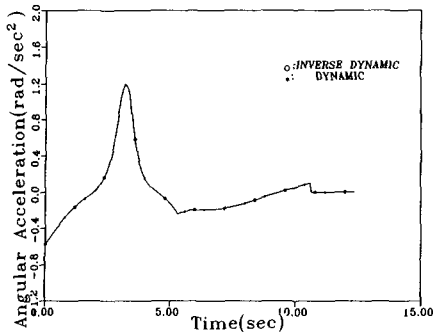


Fig. 16 Angular acceleration of bucket

위하여, 역동역학에서 구해진 실린더 힘(Fig. 14)을 각 실린더에 직접 부여하여 동역학 해석을 수행하였다. 이때 각 실린더의 구동조건은 부가하지 않음으로써 자유롭게 움직일 수 있도록 하였으며, 작용하는 굴삭력의 형태는 Fig. 13과 같이 하였다. 역동역학 해석결과와 동역학 해석결과를 비교하기 위해 버켈의 각 속도와 각 가속도를 Fig. 15과 Fig. 16에 나타내었다. 해석된 결과를 살펴보면, 버켈의 각 속도와 각 가속도 모두 일치하고 있는 것으로 보아 역동역학으로 해석된 결과들에 대한 신뢰성을 확인할 수 있었다.

5. 결 론

건설 중장비인 굴삭기를 강체로 이루어진 3차원 다물체계로 구성하고 각 연결 조인트와 부품의 모델링을 수행한 뒤, 굴삭 및 덤프운동을 해석하였다. 또한 굴삭력이 작용하는 경우에 대해서도 해석을 수행하였으며, 해석결과를 확인하기 위하여 역동역학 해석과 동역학 해석을 비교하였다. 해석의 결과로 부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 굴삭 및 덤프운동의 해석에서 알 수 있듯이, 부وم과 프레임의 연결하는 조인트 JU1에서 가장 큰 반력이 작용하며, 가속도의 변화가 심한 최저 위치로 이동하는 부분과 최저위치 부근에서 극값을 가진다. 또한, 각 조인트의 반력이 자중의 효과보다는 구동 실린더의 힘에 의해 좌우됨을 알 수 있

었다.

(2) 버켈의 굴삭력 작용시 버켈의 굴삭력의 영향은 아암 실린더가 가장 크게 받는다.

후 기

본 연구는 삼성중공업에서 부산대학교 기계기술연구소 차량메카트로닉스연구회에 지원한 연구비에 의하여 수행된 연구결과와 일부이며, 지원해 주신 기관에 감사를 드립니다.

참고문헌

- (1) Jerkovsky, W., 1978, "The Structure of Multibody Dynamics Equation," Journal of Guidance and Control, Vol. 1, No. 3, pp. 173~182.
- (2) Yoo, W. S. and Haug, E. J., 1986, "Dynamics of Flexible Mechanical Systems using Vibration and Static Correction Modes," ASME, Journal of Mechanisms, Transmissions, and Automation in Design, Vol. 108, pp. 315~322.
- (3) DADS(Dynamic Anlysis and Design System), Computer Aided Design Software Incorporated, Iowa, U.S.A.
- (4) ADAMS(Automated Dynamic Analysis of Mechanical System), Mechanical Dynamics Incorporated, U.S.A.
- (5) MEDYNA-An Interactive Analysis and Design Program for Flexible Multibody Vehicle Systems, Proc. of the 3rd ICTS Course and Seminar on Advanced Vehicle System Dynamics, Amalfy, May 1986.
- (6) Nikravesh, P. E., 1988, "Computer Aided Analysis of Mechanical Systems," Prentice-Hall, Inc.,
- (7) 유완석, 이병훈, "굴삭기의 도로 시뮬레이션 및 연결부의 반력계산," 삼성중공업 제2차년도 최종보고서, 부산대학교 기계기술연구소, 1993. 7.