

〈논 문〉

가혹하중이 작용하는 경우의 굴삭기 연결부의 반력계산

김외조* · 유완석** · 윤경화*** · 강하근***

(1995년 4월 10일 접수)

Evaluation of Joint Reaction Forces for a Hydraulic Excavator Subjected to a Critical Load

O. J. Kim, W. S. Yoo, K. H. Yoon and H. G. Kang

Key Words : Excavator(굴삭기), Multibody Dynamics(다물체동역학), Under-Frame(하부 프레임), Maximum Lifting Load(최대 인양하중), Critical Load(가혹하중)

Abstract

This paper presents a three dimensional modeling and dynamic analysis of a hydraulic excavator. An excavator is composed of a ground, an under-frame, two idlers, two sprockets, an upper-frame, a boom, an arm, a bucket, two yokes, two connecting rods, two boom cylinders, an arm cylinder, and a bucket cylinder. Each cylinder is modeled with two separate bodies which are linked to each other by a translational joint. The three dimensional model of the excavator consists of 22 bodies and each body is assumed as rigid. This paper suggested the maximum lifting capability, a critical load and reaction forces at joints from the DADS simulation. It was presumed that the reaction forces due to a critical load are three times bigger than those due to the maximum lifting capacity.

1. 서 론

건설 중장비의 하나인 유압식 굴삭기는 작업능률 및 사람이 직접 처리하기 어려운 작업의 해결 등으로 인하여 사용 폭이 점점 넓어지고 있다. 시간당 작업량을 높이기 위하여 설계자들은 용량이 더욱 큰 굴삭기를 계속하여 개발하고 있으나, 운전자들은 작업능률을 높이기 위해 무리한 작업을 자주 시도하므로 굴삭기 부품에는 설계하중 이상의 무리한

하중이 자주 가해진다. 따라서, 설계자는 부품의 안정성 및 신뢰도를 위하여 설계시 이러한 무리한 하중에 대해 대비하지 않을 수 없다. 무리한 작업에 대비한 설계를 위해서는 이러한 작업으로 부터 각 부품에 생겨나는 반력의 크기를 계산하는 것이 필수적이다. 그러나, 운전자의 운전습관이나 숙련도에 따라 작업형태가 다를 수 있으며, 작업형태가 비슷하더라도 실제의 무리한 작업을 재연하는 것이 어려운 때가 많다. 이러한 경우이거나 시험에 따른 비용이 비싼 경우에는 컴퓨터로 시스템을 모델링하고 시뮬레이션을 통하여 설계자료를 얻어내는 방법이 효율적일 수가 있다.

본 연구에서는 유압식 굴삭기의 3차원 컴퓨터 모델링을 완성하고 여러 종류의 작업을 컴퓨터로 시

*부산대학교 대학원

**회원, 부산대학교 기계기술연구소

***삼성중공업(주) 종합기술연구소

물레이션한 뒤 설계자료를 추출하고자 하였다. 굴삭기를 다물체로 이루어진 동역학적 시스템으로 모델링하기 위해서, 우주항공, 기계, 로봇분야 등의 다양한 분야에서 이용되고 있는 다물체동역학(multibody dynamics) 범용프로그램들 중의 하나인 DADS⁽¹⁾ 프로그램을 사용하였다. 굴삭기를 구성하는 작업부, 상부 프레임 및 하부 프레임을 3차원 강체로 모델링하였으며, 굴삭기의 물체를 연결하는 각 조인트에 대한 구속조건을 고려하여 알맞은 조인트를 선정하였다.

또한, 굴삭기의 하부 프레임, 롤러, 트랙, 지면으로 구성되는 지면력의 모델링에 필요한 강성과 감쇠계수를⁽¹⁾ 하중이 정적으로 가해지는 경우와⁽²⁾ 하중이 동적으로 가해지는 경우에 대해 제안하였다. 제안된 지면력 모델과 컴퓨터 모델을 이용하여 굴삭기가 최대로 들어 올릴 수 있는 최대 인양하중, 부움의 각 조인트에 작용하는 반력 및 부움 실린더의 힘을 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 구하였다. 그리고 정지상태에서 발생할 수 있는 최악의 가혹하중이 작용하는 경우 부움과 연결된 조인트에서 생기는 반력과 부움 실린더의 힘을 구하여 최대 인양하중의 경우와 각각 비교하였다. 이러한 여러 가지 운동 해석을 위해 DADS의 사용자 정의(DADS user-routine) 프로그램을 수정·보완하여 사용하였다.

2. 굴삭기의 3차원 모델링

2.1 굴삭기 전체 시스템의 모델링

굴삭기의 전체 시스템은 Fig. 1과 같이 굴삭기 전체 하중을 지면으로 전달하는 하부 프레임(under-frame), 작업부와 하부 프레임을 연결하는 상부 프레임(upper-frame), 버킷에 힘을 전달하는 작업부, 굴삭력의 향상을 위한 링크부, 구동력을 발생시키는 구동 실린더부로 나눌 수 있다. 전체 시스템을 구성하는 물체는 하부 프레임에 하부 프레임 본체, 좌우 아이들러(idler), 좌우 스프로킷(sprocket) 등 5개, 상부 프레임 1개, 작업부에 부움(boom), 아암(arm), 버킷(bucket) 등 3개, 링크부에 좌우 요크(yoke), 좌우 커넥팅로드(connecting rod) 등 4개, 구동 실린더부는 좌우 부움 실린더(boom cylinder), 아암 실린더(arm cylinder), 버킷 실린더(bucket cylinder)로 구성되고 각 실린더는 2개의 물체로 모델링하므로 8개, 지면(ground) 1개를 포함하여 총 22개이다. 해석을 위한 좌표계는 스윙센터(swing center) 위치에 하부 프레임과 상부 프레임을 연결하는 회전조인트의 상·하축을 따라 Y축, 좌우 아이들러 중심에서 좌우 스프로킷 중심을 연결하는 방향인 굴삭기의 후방을 따라 X축, 나머지 한 축을 Z축으로 정의하는

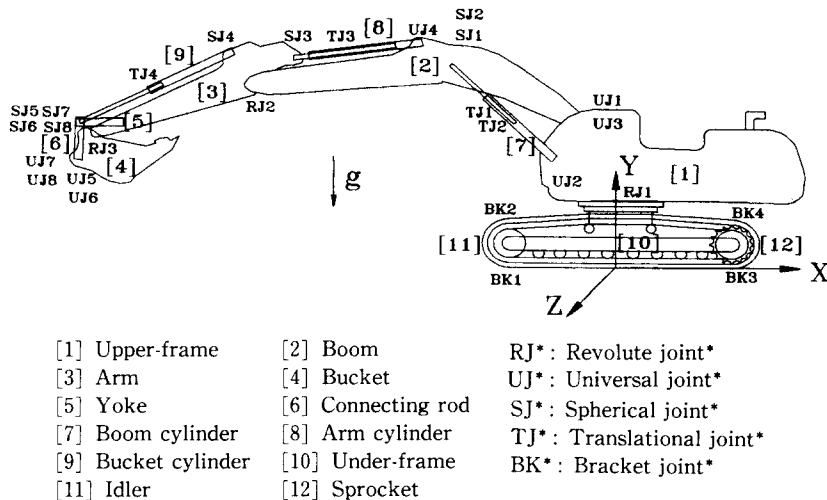


Fig. 1 Configuration of an excavator

절대좌표계와 각 물체의 질량중심에 위치한 국부좌표계로 정의한다. 각 조인트를 회전조인트로 모델링 하면 잉여 구속식(redundant constraint equation)이 발생하므로 이 잉여 구속 조건을 제거하기 위해 4개의 고정조인트(bracket joint), 3개의 회전조인트(revolute joint), 8개의 구면조인트(spherical joint), 4개의 병진조인트(translational joint) 그리고 8개의 유니버설조인트(universal joint)로 모델링하였다. 굴삭기의 각 조인트, 각 부품, 하부 프레임, 작업부, 링크부 및 구동 실린더의 모델링은 참고문헌(2)에 잘 나타나 있다.

2.2 지면력의 모델링

굴삭기의 안정성과 최대 인양하중을 해석하는 경우에 하부 롤러와 트랙 사이에 전달되는 힘을 표시하기 위해 하부 프레임을 지지하는 트랙 롤러와 지면 사이, 아이들러와 지면 사이 및 스프로켈과 지면 사이에도 스프링과 감쇠기를 설치하여 지면으로부터의 반력을 고려하였다. Fig. 2는 굴삭기의 안정성 해석에 사용한 지면력을 생성시키는 스프링 및 감쇠기의 모델링이다.

지면력은 굴삭기의 하부 롤러, 아이들러 및 스프로켈으로 전달되는 힘을 표시하기 위해 하부 프레임 좌우에 각각 8개씩 총 16개, 좌우 아이들러와 지면, 좌우 스프로켈과 지면 사이에 각각 스프링 및 감쇠기 요소로 모델링하여 표시하였다. 그러나 굴삭기에 대한 지면력을 정량적으로 표시한 자료가 없으므로, 본 연구에서는 시험자료를 이용하여 강철과 콘크리트 바닥 사이를 스프링과 감쇠기로 모델링할 때의 스프링상수와 감쇠계수를 결정하고자 한다. 시험 및 시뮬레이션에 사용한 굴삭기의 자세는 부움을 최대로 펼친 자세에서 지면이 콘크리트 바닥일 때이며 시험결과 굴삭기의 인양하중이 3.38 톤이면 굴삭기의 뒷부분인 스프로켈이 들리기 시작하고, 인양하중이 5.7 톤이면 스프로켈이 70 mm 들린다는 것이 확인되었다.

이러한 2가지 시험자료를 이용하여 지면력을 모델링하였으며, 지면력을 $F=ks^2$ 의 형태로 가정하였다. 여기서, k 는 스프링상수이며, s 는 스프링의 변형량이다.

2.3 하중이 정적으로 가해질 때의 k값 추정(3)

지면력-변형관계에서 굴삭기의 전체 계에 대한 힘 평형방정식과 모멘트 평형방정식을 구한 후, 각 하부 롤러, 아이들러 및 스프로켈에 작용하는 힘과 모멘트가 인양하중이 작용할 때 구한 위의 시험조건과 일치하도록 4단계의 시행착오법을 거쳐 구하였다.

굴삭기의 전도 하중을 W_t , 작업부 중량을 W_w , 상부 프레임 중량을 W_u , 하부 프레임 중량을 W_l , 스프로켈 중량을 W_s , 아이들러의 중량을 W_i 로 두고 수직방향의 힘에 대한 평형방정식을 세우면 식 (2.1)과 같다.

$$F_0 + F_1 + F_2 + \dots + F_9 = W_t + W_w + W_u + W_l + W_s + W_i \tag{2.1}$$

여기서, F_1, \dots, F_9 은 각 트랙 롤러에 작용하는 힘이며, F_0 과 F_9 는 각각 아이들러와 스프로켈에 작용하는 힘이다. 아이들러의 중심에 원점을 설정하고, 이 원점으로부터 각 중량까지의 작용거리를 각각 l_t, l_w, l_u, l_s, l_i 라고 할 때, 원점 주위의 모멘트 평형 방정식은 식 (2.2)과 같다.

$$F_1 l_1 + \dots + F_9 l_9 = W_t l_t + W_w l_w + W_u l_u + W_l l_l + W_s l_s \tag{2.2}$$

여기서, l_1, l_2, \dots, l_8 은 원점으로부터 각 트랙 롤러까지의 거리이며, l_9 은 원점에서 스프로켈까지의 거리이다. 식 (2.1)과 식 (2.2)에 나타난 미지수는 10개(F_0, \dots, F_9)인데, 이용할 수 있는 식은 2개이므로 각 트랙 롤러에서 지지하는 반력을 바로 구할 수는 없다. 따라서 다음과 같이 4단계를 사용하여 트랙 롤러에 작용하는 반력을 계산하였다.

단계 1 : 먼저 지면력-스프링 변형 사이의 관계식을 $F=ks^2$ 로 가정한다. 또한, 하부 프레임은 충분히 강하여 하부 프레임에 부착된 트랙 롤러의 스프링 변형(z_0, \dots, z_9)은 $n=1$ 인 선형(linear)이라고 가정한다.

단계 2 : 전도 하중이 없는 경우($W_t=0$)에 대해, 식 (2.1)과 식 (2.2)의 우변을 계산한다.

$$F_0 + F_1 + \dots + F_9 = 31,936 \tag{2.3}$$

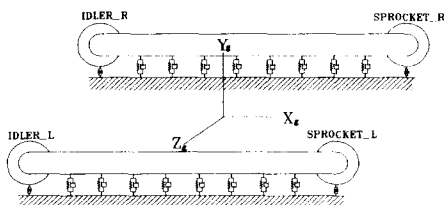


Fig. 2 Ground force modeling of an understructure

$$F_1l_1 + F_2l_2 + \dots + F_9l_9 = 56.031 \quad (2.4)$$

힘의 분포를 $n=1$ 인 1차식(linear)으로 가정하고, F_1 을 F_0 과 F_9 로 표시하면 다음과 같다.

$$F_1 = F_0 - \frac{l_1}{9} \times (F_0 - F_9) \\ = 0.8806 \times F_0 + 0.1194 \times F_9 \quad (2.5)$$

같은 방법으로 $F_2 \sim F_8$ 을 계산하여 식 (2.3)과 식 (2.4)에 대입하면 F_0 과 F_9 가 계산되고, 구해진 F_0 과 F_9 를 (2.5)의 관계식에 다시 대입하면 나머지 힘들(F_1, \dots, F_8)도 구해진다.

단계 3: 전도 하중이 3.38 톤일 때, 굴삭기의 뒷부분인 스프로켈이 들리기 시작한다는 시험조건을 이용한다. 이때, 뒷부분이 들리기 시작하므로 $F_9 = 0$, $W_t = 3380 \text{ Kg}$ 으로 두고 식 (2.3)과 식 (2.4)의 우변을 계산한다.

$$F_0 + F_1 + F_2 + \dots + F_8 = 35316 \quad (2.6)$$

$$F_1l_1 + F_2l_2 + \dots + F_8l_8 = 31391 \quad (2.7)$$

단계 2와 같이 힘의 분포를 $n=1$ 인 1차식으로 가정하고 F_1 을 F_0 으로 표시하면 다음과 같다.

$$F_1 = F_0 \times \left(1 - \frac{l_1}{l_9}\right) = 0.8806 \times F_0 \quad (2.8)$$

같은 방법으로 $F_2 \sim F_8$ 을 계산하여 식 (2.6)에 대입하면 F_0 가 계산되며, 구해진 F_0 를 (2.8)의 관계식에 다시 대입하여 나머지 힘들(F_1, \dots, F_8)을 구할 수 있다. 구해진 힘들이 식 (2.7)의 모멘트 평형방정식을 만족하면 다음 단계(단계 4)로 넘어간다. 만약 식 (2.7)의 모멘트 평형방정식을 만족하지 않는다면, 1차식($n=1$)으로 가정한 힘의 분포가 옳지 않았으므로 단계 2로 되돌아가 힘의 분포를 나타내는 지수를 다시 가정한 후 단계 2와 단계 3을 되풀이한다. 이상의 여러 가지 n 값을 시행 착오법으로 지수 n 의 값을 구한다.

단계 4: 전도 하중이 5.7 톤일 때, 굴삭기 뒷부분인 스프로켈이 70 mm 들린다는 시험조건을 이용한다. 이때 뒷부분이 들리기 시작하므로 $F_9 = 0$ 인 것은 확실하나, 어느 트랙 롤러까지 들려서 반력을 받지 않을지는 판단하기 어렵다. 단계 3에서 구해진 n 값을 사용하고, 트랙 롤러의 반력 $F_8 = 0$ 이라는 가정을 대입하여 힘과 모멘트의 평형방정식이 성립하는지를 확인한다. 만약 $F_9 = F_8 = 0$ 임에도 식 (2.1)과 식 (2.2)가 만족하지 않으면, $F_9 = F_8 = F_7 = 0$ 으로 두고 다시 시도한다. 힘과 모멘트의 평형

방정식이 성립될 때까지 들려지는 트랙 롤러의 숫자를 늘려 가면서 시행착오법을 사용한다.

단계 4까지 거쳐서 굴삭기 최대 펼침 자세에서 최대 전도하중을 구하기 위해 사용할 지면력 모델의 스프링상수는 $k = 1.474 \times 10^6 \text{ N/m}$ 이고, 지수는 $n = 0.92$ 로 구해졌다. 감쇠계수(damping coefficient) c 를 구하기 위해 감쇠(damping)가 점성감쇠(viscous damping)라 가정하고, 굴삭기의 동적 시험결과를 사용하여 감쇠계수를 결정하였다.

굴삭기를 수평위치에서 수직위치로 급상승시키는 굴삭기의 동적시험(dynamic test)에서 얻어진 결과는 굴삭기 상부 프레임 뒷쪽 중앙부분(카운터웨이트 아래쪽)의 피칭량이 6초 동안에 9회이고, 최대 피칭량은 50 mm였다. 위의 시험결과와 비슷한 응답을 얻도록 여러 가지로 감쇠계수를 변화시켜 본 결과 감쇠계수는 $1.0 \times 10^5 \text{ N} \cdot \text{s/m}$ 로 구해졌다.

2.4 하중이 동적으로 가해질 때의 k 값 추정

이상의 정역학적 평형방정식으로부터 얻어진 지면력-변형관계 식을 거친도로(rough road)를 주행하거나 동적으로 부가되는 경우에 적용가능한지 확인하였다. 확인을 위하여 100 mm × 100 mm의 지그 재그형 연속 장애물이 설치된 거친노면을 제1속(3.3 Km/h)과 제2속(4.6 Km/h)으로 통과할 때 Table 1에 나타낸 3점의 최대 수직 가속도를 측정된 시험결과와 시뮬레이션 결과를 비교하였다. 정역학적 평형방정식으로부터 얻어진 k 와 c 를 사용하여 동적인 시험에 적용시킨 결과, 스프링의 변형값이 지나치게 커지는 비현실적인 결과를 얻었다. 따라서 동적인 하중에 대해서는 강성과 감쇠계수, 침하량의 지수승을 시행착오법으로 바꾸어 가면서 시험결과와 일치하도록 조정하였다. 14가지의 경우를 시뮬레이션하였으며, 각 경우의 가속도 값과 실험결과를 Table 1에 비교하였다.

14가지의 경우 중에서 강성 k 와 침하량의 지수승 n 값이 $k = 1.474 \times 10^7 \text{ N/m}$, $n = 1.3$ 인 경우 8이 시험결과와 비교적 일치하였다.

이상의 지면력 해석결과를 바탕으로 본 연구에서는⁽¹⁾ 정적으로 하중이 가해지는 경우와⁽²⁾ 동적으로 하중이 가해지는 경우 또는 거친도로 운행의 두 가지에 대한 지면력-변형관계 식을 추정하였으며, 다음과 같이 형태 I과 형태 II로 분류하였다.

$$\text{지면력 모델링 } F = kz_n + c\dot{z}$$

형태 I (인양하중 계산용 또는 정적하중 작용시)

Table 1 Maximum vertical acceleration at the point of interest ($g=9.8 \text{ m/sec}^2$)

Case	Parameter estimation			1st speed			2nd speed		
	k	c	n	CAB mount	Sprocket	#1 roller	CAB mount	Sprocket	#1 roller
1	1.4 E9	1.0 E5	1.5	81 g	66 g	92 g	117 g	100 g	122 g
2	1.4 E9	1.0 E6	1.5	31 g	20 g	32 g	35 g	33 g	35 g
3	1.4 E8	1.0 E5	1.5	25 g	13 g	24 g	41 g	48 g	54 g
4	1.4 E8	1.0 E6	1.5	8 g	10 g	8 g	163 g	163 g	183 g
5	1.4 E7	1.0 E5	1.5	3 g	3 g	3 g	5 g	4 g	4 g
6	1.4 E7	1.0 E6	1.5	5 g	4 g	5 g	4 g	5 g	7 g
7	1.4 E7	1.0 E4	1.5	10 g	9 g	9 g	10 g	12 g	10 g
8	1.4 E7	1.0 E5	1.3	4 g	3 g	4 g	5 g	4 g	5 g
9	1.4 E7	5.0 E5	1.5	9 g	7 g	9 g	15 g	90 g	99 g
10	7.0 E7	5.0 E5	1.3	10 g	14 g	10 g	16 g	10 g	16 g
11	7.0 E7	0.8 E5	1.5	7 g	5 g	7 g	6 g	5 g	6 g
12	1.4 E7	1.2 E5	1.5	4 g	4 g	4 g	4 g	4 g	4 g
13	1.1 E7	1.2 E5	1.5	4g	4 g	4 g	3 g	3 g	3 g
14	1.7 E7	1.2 E5	1.5	4 g	4 g	4 g	5 g	5 g	5 g
Experimental results				4 g	2 g	3 g	5 g	3 g	4 g

$k=1.474 \times 10^6 \text{ N/m}$
 $c=1.0 \times 10^5 \text{ N} \cdot \text{s/m}$
 $n=0.92$

형태 II (거친도로 운행용 또는 동적하중 작용시)

$k=1.474 \times 10^7 \text{ N/m}$
 $c=1.0 \times 10^5 \text{ N} \cdot \text{s/m}$
 $n=1.3$

3. 굴삭기의 최대 인양하중 추정 시뮬레이션

3.1 최대 인양하중 계산⁽⁴⁾

최대 인양하중이란 굴삭기의 버킷에 하중을 가할 때 스프로켓이 들려져 계속 그 위치를 유지하나, 하중을 조금만이라도 더 가할 시는 스프로켓이 그 들려진 위치를 유지하지 못하고 굴삭기가 앞으로 굴러서 전도할 때의 하중을 말한다. 하부 프레임과 지면 사이에 스프링 및 감쇠기의 모델링을 통하여 굴삭기의 최대 인양하중과 안정성을 파악하기 위하

여 시뮬레이션을 수행한 결과, Fig. 3에서 보는 바와 같이 최대 펼침자세에서의 굴삭기 최대 인양하중은 7.5 톤으로 확인되었다.

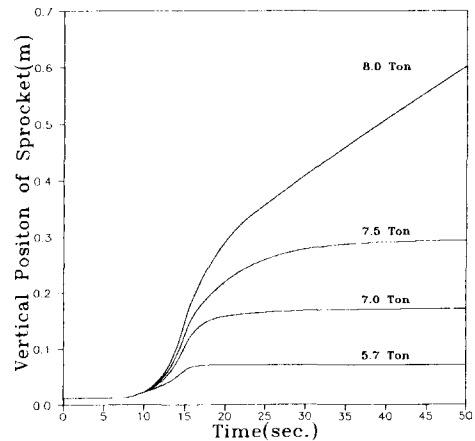


Fig. 3 Maximum lifting load with a full-reach position

3.2 최대 인양하중시 조인트와 실린더에 작용하는 힘

최대 인양하중인 7.5 톤을 버킷에 가할 때 각 물체를 연결하는 조인트들 중에서 많은 힘을 받을 것으로 예상되는 조인트는 하부 프레임과 상부 프레임을 연결하는 조인트 RJ1, 부움과 상부 프레임을 연결하는 조인트 UJ2, 부움과 아암을 연결하는 조인트 RJ2일 것이므로 Fig. 4에 최대 인양하중시 각 조인트의 x축 방향 반력을 나타내었다. Fig. 4에서 볼 수 있듯이 조인트들 중 UJ1에 가장 큰 반력을 받는다.

버킷에 최대 인양하중을 가하면 버킷 실린더, 아암 실린더 및 좌우 1개씩 2개의 부움 실린더가

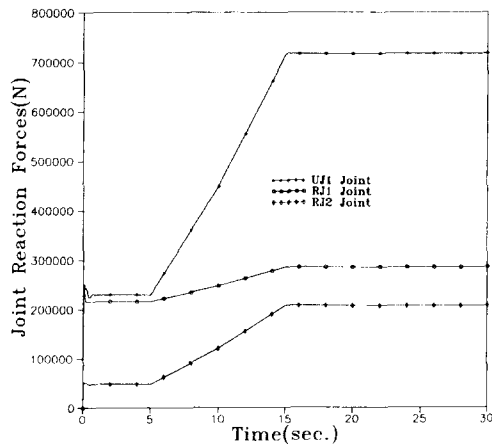


Fig. 4 Joint reaction forces along local x direction due to the maximum lifting load

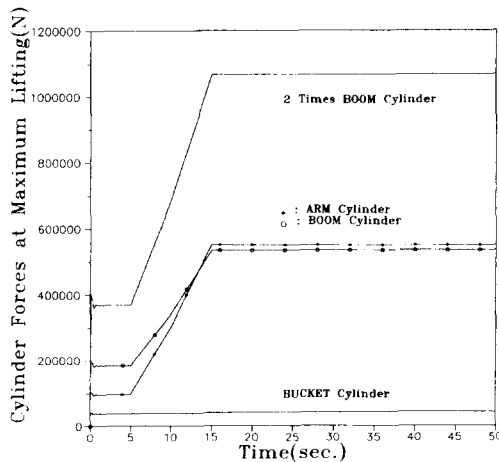


Fig. 5 Cylinder forces due to the maximum lifting load

Fig. 1과 같은 작업부의 형상을 유지하기 위해 각 물체의 길이 방향, 즉 각 물체의 x축 방향으로 각 실린더의 힘이 증가하여야 한다. 2개의 부움 실린더의 합, 1개의 부움 실린더, 아암 실린더 및 버킷 실린더 등 각 실린더에 작용하는 힘의 크기를 Fig. 5에 나타내었다. 여기서 버킷 실린더의 힘에 대한 크기변화가 없는 이유로는 최대 인양하중을 아암과 버킷을 연결하는 조인트 UJ6에 가하였으므로 버킷 실린더에는 힘의 크기변화가 없어도 그 형상을 유지할 수 있기 때문이다.

4. 가혹하중 작용시 굴삭기의 연결부 반력

4.1 가혹하중의 정의

작업부를최대로 펼친 자세에서 버킷의 전후 방향과 수직방향의 운동을 고정하고, 버킷 실린더 및 아암 실린더의 길이 변화가 생기지 않도록 고정한다. 부움 실린더의 길이를 변화시키면 상부 프레임과 하부 프레임이 부움과 상부 프레임을 연결한 조인트 UJ1를 중심으로 회전하면서 굴삭기의 뒷부분이 들리게 되는 운동을 유도할 수 있다. 이렇게 부움 실린더의 길이 변화로 뒷부분을 들어올린 후 지면에 아주 근접하도록 내리다가 급히 다시 들어올리면, 굴삭기의 관성력을 극복하기 위해 큰 힘이 필요하므로 굴삭기의 각 조인트와 각 실린더에는 최악의 조건이 주어지게 된다. 이와 같이 굴삭기에 가할 수 있는 최악 상태의 하중을 가혹하중이라 정의한다. 이러한 하중의 형태는 굴삭기가 암석채취와 같은 작업을 수행할 때 버킷에 큰 힘이 걸리다가 갑자기 장애물을 놓쳤을 때 일어날 수 있는 하중과 비슷한 것으로 생각할 수 있다.

가혹하중을 DADS 프로그램의 시뮬레이션으로부터 구하기 위하여 가혹하중을 유발하는 운동을 다음과 같이 모델링하였다. 먼저, 버킷의 극좌표계의 전후방향과 수직방향위치를 구속하여 고정하고, 아암 실린더와 버킷 실린더는 각 실린더의 구동조건을 실린더가 변하지 않도록 고정하므로 버킷에서 부움까지의 자유도가 없는 하나의 강체처럼 만든다. 부움 실린더의 길이를 변화시키므로써 상부 프레임과 하부 프레임을 연결하는 조인트 UJ1 주위로 굴삭기의 스프로켈을 들어올리도록 하였다. 부움 실린더의 길이 변화량을 얻기 위해 좌측 아이들러와 지면을 회전 조인트로 연결하고, 이 조인트의

상대 각도를 변화시켰다.

실제 시험을 통한 가혹하중시의 각 조인트에 작용하는 반력과 각 실린더에서 필요한 힘의 크기를 구한 값은 없기 때문에 다음과 같은 가상의 시나리오를 통하여 시뮬레이션을 수행하였다. 가상의 시나리오는 0~2초까지는 굴삭기가 정적 평형을 찾고, 2~7초까지는 스프로켈을 올리고, 7~10초까지 내리다가 10~10.5초까지 급히 들어올리고, 10.5~14초까지는 천천히 더 들어 올려 안정을 찾도록 하였다. 10~10.5초인 0.5초 사이에 조인트와 실린더에 가혹하중이 작용하여 최악의 조건을 만든다. 이런 시나리오를 얻기 위한 부움 실린더의 길이 변

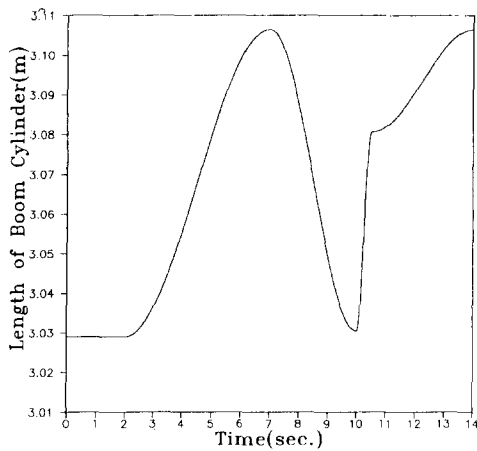


Fig. 6 Length of boom cylinder to generate a critical load

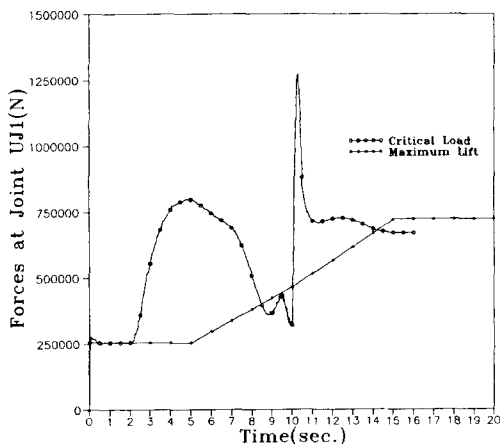


Fig. 7 Comparison of joint reaction forces at UJ1 joint (full reach position with type I of ground force)

화를 Fig. 6에 나타내었고, 최대 약 0.072 m의 변화가 있었다.

4.2 가혹하중 시뮬레이션(지면력 형태 I을 사용한 경우)

먼저 지면력 형태 I을 사용하여 가혹하중의 해석을 시도하였다.

좌측 아이들러와 지면을 연결한 회전조인트를 제거한 후 위에서 구한 부움 실린더의 길이변화를 부움 실린더의 구동조건으로 사용하면, 이 구동 조건을 유지하기 위한 부움 실린더의 힘 크기와 조인트 UJ1에 작용하는 반력을 구할 수 있다. 작업부를 최대 펼침 자세에서 지면력 형태 I을 사용한 해석 결과로 얻어진 조인트 UJ1에 작용하는 반력은 Fig. 7에 나타내었고, 부움 실린더의 힘 크기 변화는 Fig. 8에 나타내었다.

굴삭기의 작업에서 가혹하중이 생겨날 가능성이

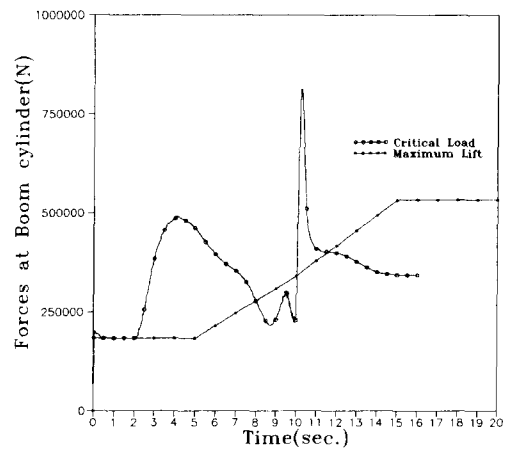


Fig. 8 Comparison of boom cylinder forces(full reach position with type I of ground force)

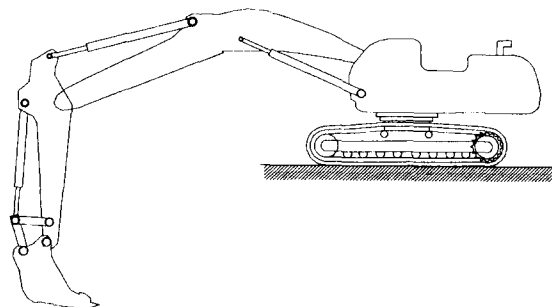


Fig. 9 Attitude of excavator for a maximum digging force

높은 자세는 최대 굴삭력 자세일 것이므로 최대 펼침 자세에서 작업부 전체를 아래로 내린 후 약간 끌어 당겨 Fig. 9와 같이 최대 굴삭력 자세를 구하였다. 최대 굴삭력 자세와 최대 펼침 자세시 부음 실린더의 길이가 다르므로 최대 굴삭력 자세의 시뮬레이션을 위해서는 새롭게 부음 실린더의 길이 변화를 얻어야 한다. 최대 펼침 자세에서 구한 과정과 동일하게 얻은 부음 실린더의 길이 변화를 Fig. 10에 나타내었고, 최대 0.0775 m의 변화가 있다. 이와 같은 운동을 나타내는 굴삭기 스프로켈의 전후방향과 수직방향의 운동변화를 Fig. 11에 나타내었다.

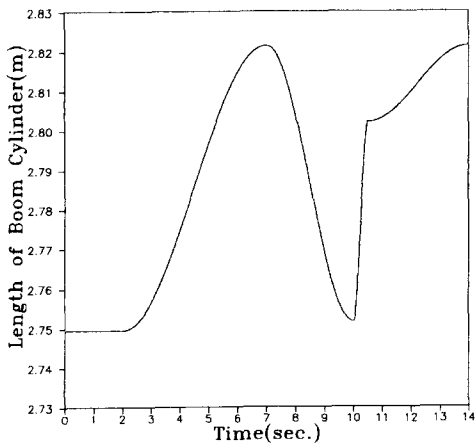


Fig. 10 Length of boom cylinders to generate a critical load (digging force)

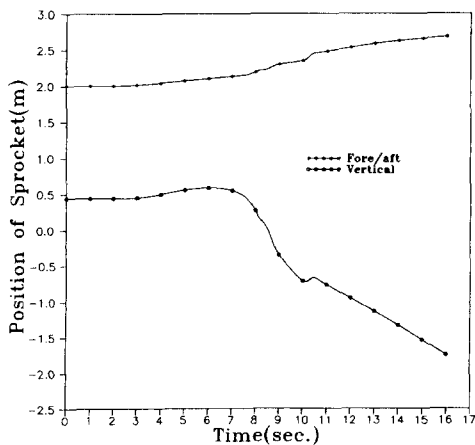


Fig. 11 Positions of sprocket subjected to the critical load (digging force with type I of ground force)

지면력 형태 I을 이용하여 해석한 결과는 최대 굴삭력 자세에서 가혹하중을 가할 때 하부 프레임과 지면 사이에 설치한 스프링 및 감쇠기의 강성이 약하여 굴삭기는 스프로켈이 들렸다 내려지는 운동을 못하고 뒤로 밀리면서 아래로 내려앉았다. 가혹하중이 작용하는 순간의 운동변화가 급격한 시뮬레이션에서는 정적인 해석에서 구해진 지면력 형태 I은 좋은 결과를 제공하지 못함을 확인하였다.

4.3 최대 펼침자세에서의 가혹하중 시뮬레이션 (지면력 형태 II를 사용한 경우)

최대 인양하중 해석을 위한 모델링에서 사용한

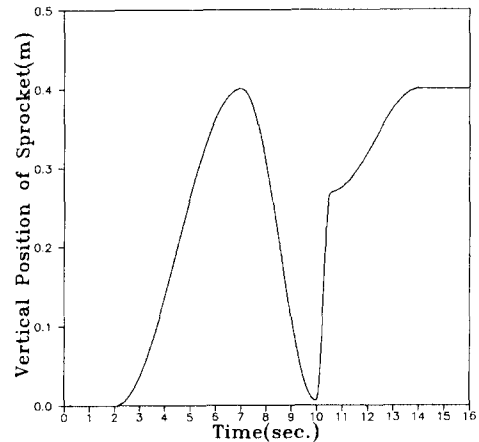


Fig. 12 Vertical position of the sprocket versus time due to the critical load (full reach position with type II of ground force)

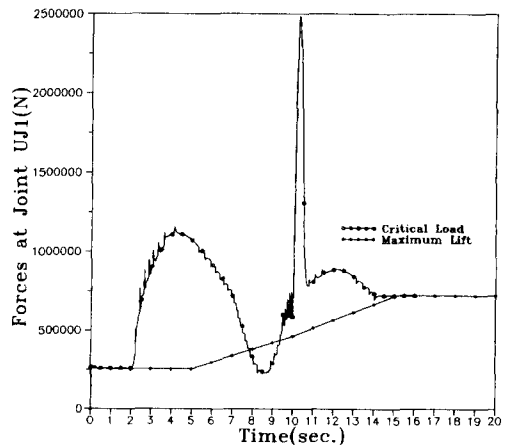


Fig. 13 Comparison of joint reaction forces at UJ1 joint (full reach position with type II of ground force)

하부 프레임과 지면 사이의 스프링상수 및 감쇠기의 계수(지면력 형태 I)는 가속하중을 가할 때 적당하지 않았으므로 거친도로상(rough road)의 운행에서 사용한 상수들(지면력 형태 II)로 바꿔 사용하였다. 최대 펼침자세에서 가속하중을 가할 때 스프로켓의 수직위치 변화, 조인트 UJ1에 작용하는 반력, 부움 실린더에 필요한 힘의 크기를 각각 Fig. 12, Fig. 13 및 Fig. 14에 나타내었다. Fig. 13에서 정적 평형을 찾는 0~2초와 가속하중의 운동이 완전히 끝난 다음인 15초 이후 조인트 UJ1에 걸리는 반력의 크기는 최대 인양하중시와 최대 펼침자세의 가속하중이 가해질 때 서로 일치한다. 최

대 인양하중 자세에서는 10~10.5초 사이에 큰 충격력으로 가속하중이 가해지는데, Fig. 13에서 보는 바와 같이 가속하중시 조인트 UJ1에서의 반력 2.5×10^6 N이 최대 인양하중시 조인트 UJ1에서의 반력 7.2×10^5 N 보다 약 3.5배 크다. Fig. 14에서 보는 바와 같이 가속하중시 부움 실린더의 힘은 1.7×10^6 N로서, 최대 인양하중시 부움 실린더의 힘 5.3×10^5 N보다 약 3.2배 크다.

4.4 최대 굴삭력 자세에서의 가속하중 시뮬레이션 (지면력 형태 II를 사용한 경우)

최대 굴삭력 자세의 가속하중을 가할 때 스프로

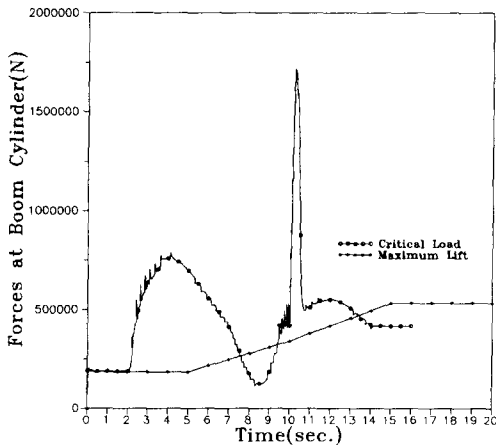


Fig. 14 Comparison of the boom cylinder force (full reach position with type II of ground force)

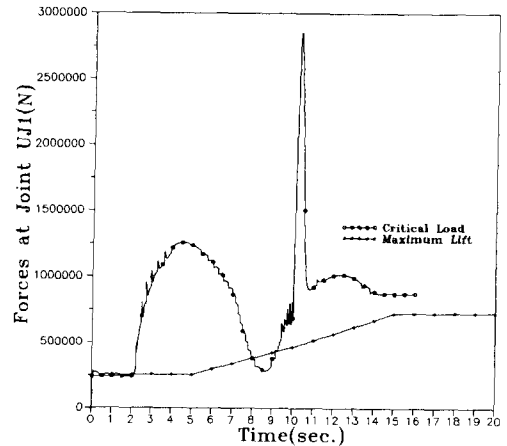


Fig. 16 Comparison of joint reaction forces at UJ1 joint (digging position with type II of ground force)

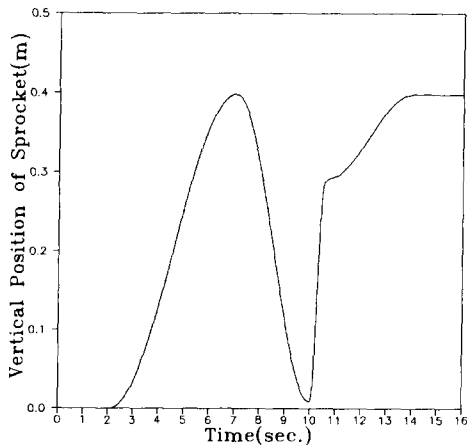


Fig. 15 Vertical position of the sprocket versus time due to the critical load (digging position with type II of ground force)

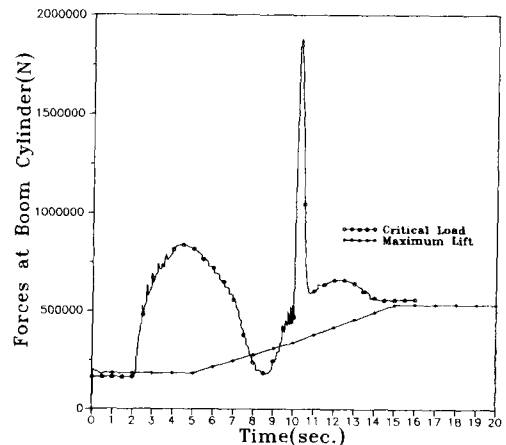


Fig. 17 Comparison of the boom cylinder force (digging position with type II of ground force)

켈의 수직위치, 최대 인양하중시와 최대 굴삭력 자세의 가혹하중을 가할 때 조인트 UJ1에 작용하는 반력, 부움 실린더의 힘변화를 Fig. 15, Fig. 16, Fig. 17에 각각 나타내었다. Fig. 15에서 보듯이 지면력 형태 II를 사용하면 스프로켈이 지면 밑으로 계속 떨어지는 지면력 형태 I에 비해 좋은 결과를 보이고 있음을 알 수 있다. Fig. 16에서 볼 수 있듯이 최대 굴삭력 자세에서도 10~10.5초 사이에 큰 충격력으로 가혹하중이 생겨나며, 가혹하중시 조인트 UJ1에서의 반력 $2.86 \times 10^6 \text{ N}$ 이 최대 인양하중시 조인트 UJ1의 반력 $7.2 \times 10^6 \text{ N}$ 보다 약 4배 크다. Fig. 17에서 최대 굴삭력의 가혹하중시 부움 실린더의 힘 $1.88 \times 10^6 \text{ N}$ 은 최대 인양하중시 부움 실린더의 힘 $5.3 \times 10^5 \text{ N}$ 보다 약 3.6배 크다.

5. 결 론

본 연구에서는 다물체동역학기법을 이용하여 유압식 굴삭기의 3차원 컴퓨터 모델을 수립하고, 전산 시뮬레이션을 통하여 굴삭기의 최대 인양하중을 구하였으며, 굴삭기에 가할 수 있는 최악 조건인 가혹하중도 조인트와 실린더에서 얻었다. 또한 조인트 UJ1에 작용하는 반력과 부움 실린더의 힘 크기를 최대 펼침자세의 가혹하중과 최대 굴삭력 자세의 가혹하중에 대하여 구하고 최대 인양하중시와 서로 비교하였다.

본 논문에서 모델링한 굴삭기의 시뮬레이션을 통하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

(1) 최대 펼침자세에서의 최대 인양하중은 7.5톤으로 산출되었다.

(2) 최대 펼침자세에서 가혹하중을 가할 때는 최대 인양하중을 가할 때 보다 조인트 UJ1의 반력이 3.5배, 부움 실린더의 힘은 3.2배 크게 작용하는 것으로 나타났다.

(3) 최대 굴삭력 자세의 가혹하중을 가할 때는 최대 인양하중을 가할 때 보다 조인트 UJ1의 반력은 4배, 부움 실린더의 힘은 3.6배 크게 작용하는 것으로 나타났다.

(4) 가혹하중과 같은 동적하중이 작용하는 경우 및 최대 인양하중과 같이 정적으로 하중이 가해지는 경우 지면력 모델링을 위한 스프링상수와 감쇠계수를 각각 제안하였다.

참고문헌

- (1) DADS(Dynamic Analysis and Design System), *User's Manual, Version 6.5*, Computer Aided Design Software Inc., Iowa, U. S. A.
- (2) 김외조, 유완석, 이병훈, 이만형, 윤경화, 1993, "굴삭기의 3차원 모델링 및 역동역학 해석," 대한기계학회논문집, 제17권, 제8호, pp. 2043~2050.
- (3) 유완석, 이병훈, 김외조, 강하근, 1994, "굴삭기의 도로 시뮬레이션 및 연결부의 반력계산," 삼성중공업(주) 종합보고서, 기계기술연구소, 부산대학교.
- (4) 강하근, 김외조, 유완석, 이병훈, 1994, "컴퓨터 시뮬레이션을 이용한 굴삭기의 최대 인양력 계산," 대한기계학회 부산지부 춘계학술대회, pp. 68~71.