

용접부 피로강도를 고려한 굴삭기 붐 구조물 설계(I)

박 상 철*[†]

*거제대학 조선과

Design of Excavator Boom Structure Based on Fatigue Strength of Weldment(I)

Sang-Chul Park*[†]

*Dept. of Naval Architecture, Koje College, Geoje 656-701, Korea

[†]Corresponding author : novacek@naver.com

(Received February 1, 2010 ; Revised April 2, 2010 ; Accepted July 8, 2010)

Abstract

The purpose of this study is to develop improved boom structures with reliable fatigue strength of weldment and lower production cost. For that purpose, multibody dynamic analysis was performed to evaluate forces acting on arm & boom cylinders and joints of boom structure during operation of an excavator for three working postures, then stress analysis was made to investigate stress distribution around diaphragms at the bottom plate of boom structures which was known to be susceptible to fatigue failures of welded joints, and finally boom structure with optimum arrangement of diaphragms was proposed. This work basically consists of the following two parts: part 1 focuses on multibody dynamic analysis of excavators during operation and part 2 includes evaluations of fatigue strength of welded joints for modified boom structures.

Key Words : Excavator, Bucket, Arm & boom structures, Fatigue failures, Welded joint, Working posture, Multibody dynamics, Reaction force, Diaphragm, Stress distribution

1. 서 론

굴삭기는 건설현장에서 널리 사용되고 있는 대표적인 건설장비로 그 사용 범위가 점차 확대되고 있다. 그러나 굴삭기는 장비 특성상 현장에서 다양한 작업을 수행하게 되며 그에 따라 복잡한 하중상태에 노출됨으로서 설계의 초기단계에서 굴삭기 구조물의 안전성을 정량적으로 평가하고 제품의 신뢰성을 확보하는데 큰 어려움이 있다. 사용자는 작업능률을 높이기 위하여 빈번히 무리한 작업을 수행하며 이로 인하여 굴삭기 작업장치 및 부품에는 설계하중 이상의 과도한 하중이 작용하게 되어 구조적인 결함이 빈번히 발생하고 있는 실정이다. 굴삭기의 작업장치는 Fig. 1과 같이 굴삭기 앞부분의 버킷(bucket), 암(arm), 붐(boom)으로 구성된 다관절 구조물이며, 이러한 작업장치는 버킷 실린더, 암 실

린더, 붐 실린더에 의하여 구동되도록 설계되어 있다. 실제 굴삭작업시 버킷에 작용하는 하중이 작업장치 중심부로 전달되어 암 그리고 특히 붐 구조물 내부 용접부에 피로파손이 많이 발생한다고 보고되고 있다.

붐은 중앙부가 위로 솟아오르고 상자형 단면을 갖는 비교적 단순한 형태의 구조물로서, 파손 양상을 살펴보

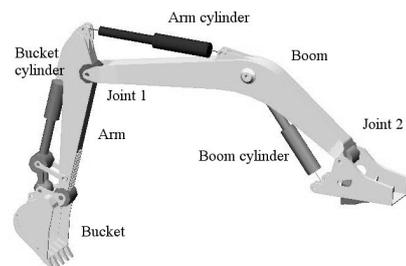


Fig. 1 Configuration of bucket, arm and boom structures

면 굽힘강성을 증가시키기 위하여 내부에 설치한 다이아프램(diaphragm)과 붐 하부 판을 연결하는 용접부에 균열이 발생하여 하부 판 표면으로 전파하여 최종 파단이 발생하는 것을 알 수 있다.

본 연구는 1, 2편으로 구성되어 있는데 1편에서는 여러 가지 굴삭작업시 굴삭기 작업장치의 실린더와 연결부에 작용하는 힘과 반력을 3가지 작업자세에 따라 평가하였으며, 2편에서는 이러한 하중이 굴삭작업이 진행됨에 따라 작업장치에 작용할 때 응력해석 및 용접부 피로수명 평가를 통하여 붐 구조물의 내부 형상을 개선하고자 하였다.

2. 굴삭기 기구해석

2.1 운동방정식 및 해법

다물체 시스템에서 외부로부터 힘이 가해질 때 힘에 의하여 발생하는 물체의 운동을 해석하는 것을 정동역학(forward dynamics), 반대로 물체가 주어진 궤적(path)을 따라 운동하도록 하기 위해 시스템의 연결부 등에 가해주어야 할 힘을 구하는 것을 역동역학(inverse dynamics)이라 한다.

기계 시스템의 공간운동에서 3차원 운동을 해석하기 위하여 회전좌표로 오일러 매개변수(Euler parameter)를 사용하면 물체 i에 대한 오일러 매개변수 구속조건식은 다음과 같다¹⁾.

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

여기서 Φ 는 구속벡터, P는 오일러 매개변수 벡터이다. 그리고 기계 시스템에서 물체를 연결하는 조인트에서의 기구학적 구속조건식을 $\Phi^K(q)$, 역동역학 해석에서 구동조건을 표시하는 구동조건식을 $\Phi^D(q, t)$, 오일러 매개변수 구속조건식을 $\Phi^P(q)$ 라 하면 전체의 구속조건식은 다음과 같다.

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

물체의 속도를 구하기 위해 식(2)를 시간에 대해 미분하면 다음과 같은 속도관계식이 얻어진다.

$$\Phi_q \dot{q} = -\Phi_t \tag{3}$$

여기서, Φ_q 는 구속방정식 $\Phi(q, t)$ 를 좌표 q에 대해 편미분한 자코비안 행렬(Jacobian matrix)이며, Φ_t 는

구속방정식을 시간에 대해 편미분한 것이다. 식(3)을 시간에 대해 다시 미분하면 다음과 같은 가속도 관계식을 얻는다.

$$\Phi_q \ddot{q} = -[(\Phi_q \dot{q})_q \dot{q} + 2\Phi_{q_t} \dot{q} + \Phi_{tt}] = \gamma \tag{4}$$

위의 구속조건을 만족시키기 위해 라그랑지 곱수(Lagrange multiplier)를 사용하여 운동방정식을 기술하면 다음과 같은 미분 대수방정식으로 표시된다.

$$M \ddot{q} + \Phi_q^T \lambda = F_A \tag{5}$$

$$\Phi_q^T \ddot{q} = \gamma \tag{6}$$

여기서 λ 는 라그랑지 곱수이며, F_A 는 외력 벡터이다. 수치해석 방법으로는 기계 시스템의 초기 좌표 q와 속도 \dot{q} 를 사용하여 식(6)의 선형방정식으로부터 가속도 \ddot{q} 를 구한 후 식(5)로부터 조인트의 반력을 구할 수 있다.

2.2 작업장치의 형상 및 작업조건

본 연구에서는 케도형(crawler type) 굴삭기를 대상으로 하였으며 작업장치의 작업조건은 버킷 실린더의 최대 스트로크(stroke)와 암 실린더의 최대 스트로크, 붐 실린더의 최대 스트로크 범위 내에서 결정되었으며, 굴삭기의 주요 구조 부재에는 용접구조용 고강도 압연강재, 링크(link) 및 실린더에는 고강도 강 및 고강도 주강이 사용되고 있다.

굴삭기의 작업장치는 기구학적으로 보면 암과 붐을 연결하는 조인트 1, 상부 프레임과 붐을 연결하는 조인트 2, 버킷을 구동하기 위한 버킷 실린더, 암을 구동하기 위한 암 실린더 그리고 붐을 구동하기 위한 붐 실린더로 구성되어 있으며, 붐 구조물에는 조인트 1, 조인트 2, 암 실린더 및 붐 실린더 구동에 의한 하중이 작용하게 된다.

2.3 작업장치의 기구해석

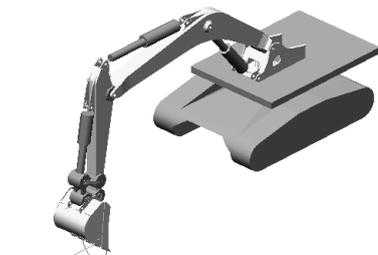
굴삭기는 장비 특성상 사용자의 운전습관이나 숙련도 그리고 작업장에 따라 다양한 현장 작업을 수행하기 때문에 작업장치가 받게 되는 하중이력(load history)을 모든 경우에 대해 정량적으로 평가하는 것은 몹시 어려운 일이다. 따라서 본 연구에서는 굴삭기의 굴삭, 파쇄, 인양, 충돌, 압토 등과 같은 여러 작업 중에서 기본적인 가장 많이 사용되는 굴삭작업에 대하여 기구해석을 통하여 암 조인트, 붐 조인트, 암 실린더, 붐 실린더에 작용하는 하중 및 반력을 작업자세, 작업시간의 경

과에 따라 평가하고자 하였다.

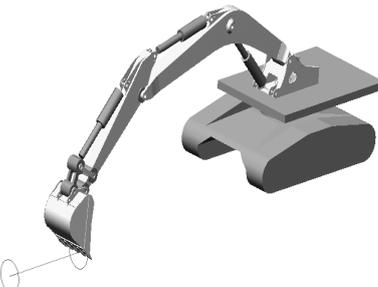
굴삭작업은 단순히 버킷으로 작업 지면을 굴삭(digging)만 하는 것이 아니라 굴삭 후 인양(lifting), 선회(swing), 상차(dumping) 등과 같은 일련의 작업 과정을 포함하는 것으로서, 굴삭작업시 작업영역은 고정되어 있는 것이 아니라 작업 장치의 위치에 따라 연속적으로 변화하는 특성을 가지고 있다^{2,3)}.

굴삭기는 굴삭작업시 작업장치의 위치에 따라 최대 굴삭깊이 자세, 최대 굴삭반경 자세, 최대 굴삭높이 자세로 나눌 수 있으며, 굴삭작업에 의하여 굴삭기에 작용하는 굴삭력을 기준으로 하면 최대 굴삭력 자세도 검토할 필요가 있다.

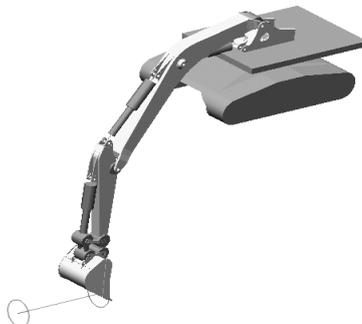
따라서 Fig. 2와 같이 굴삭기의 기본 작업인 굴삭작업에 의한 굴삭력과 작업장치의 초기 위치를 고려하여 최대 굴삭력 자세(P1), 최대 굴삭반경 자세(P2) 그리고 최대 굴삭깊이 자세(P3)로 분류하여 기구해석을 수



(a) Max. digging force posture, P1



(b) Max. digging reach posture, P2



(c) Max. digging depth posture, P3

Fig. 2 Types of excavator working posture

행하였다. 그리고 기구해석은 1) 굴삭작업시 지반과 버킷의 반력을 고려하여 초기 굴삭반력을 구하는 경우와 2) 굴삭 후 인양, 선회, 상차에 따른 작업반력을 구하는 경우 2가지로 나누어 해석을 수행하였다.

기구해석은 상업적인 기구해석 전용프로그램을 사용하여 작업장치 외에 상부 프레임 및 크롤러(crawler)를 포함하는 전체 굴삭기를 모델링하였으며, 주어진 해석모델에서 모든 조인트는 레버루트(revolute), 스페리컬(spherical) 조인트를 적절히 사용하여 구동시 각 조인트에 과도한 구속이 발생하지 않도록 하였다. 또한 버킷에는 굴삭 후 일련의 작업에서 흙의 무게를 자체 중량에 추가적으로 고려하였다⁴⁾.

3. 기구해석 결과 및 고찰

위에 언급한 굴삭기의 작업조건을 사용하여 처음 굴삭작업(0~1.2초)이 시작되었을 때, 지반 및 암반의 반작용에 따른 반력을 평가하기 위하여 버킷 중앙부에 로프(rop)요소를 암반과 연결하여 굴삭에 따른 로프 인장력을 구하여 굴삭반력을 평가하였다⁵⁾. 3가지 작업 자세에 따라 굴삭을 시작하였을 때 기구해석을 수행하여 굴삭반력을 평가하였으며, 해석결과로서 굴삭작업에 의하여 암과 흙의 연결부인 조인트 1에 작용하는 굴삭 반력(reaction force)의 분포를 굴삭자세, 작업시간에 따라 Fig. 3에 나타내었다. 그림에서 반력은 조합하중(resultant force), 즉 x, y, z-방향 하중을 전부 포함하는 $F_R = \sqrt{(F_x)^2 + (F_y)^2 + (F_z)^2}$ 로 나타내었으며, 점차적으로 증가하다가 0.9초 이상에서는 일정한 값을 나타내고 있다. 조인트 1에서 굴삭반력의 크기는 최대 굴삭 깊이 자세(P3)에서 약 1,200,000N으로 가장 크고 최대 굴삭력 자세(P1), 최대 굴삭반경 자세(P2) 순서로 작용하고 있음을 알 수 있다. 이것은 초기 작업 자세에서 버킷에 가해지는 하중에 의해 암에 작용하는 반력이

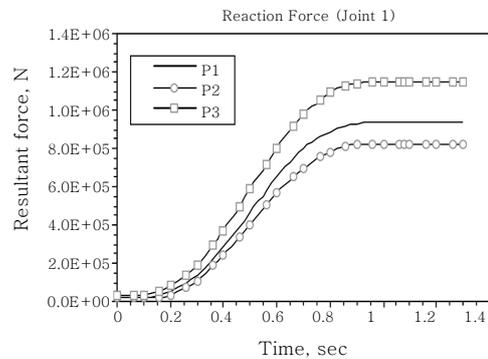


Fig. 3 Reaction forces at joint 1 for working postures(P1, P2, P3)

다르게 작용하기 때문이다.

굴삭기가 지반 굴삭 후 Fig. 4와 같이 흙을 버킷에 담은 굴삭 시점에서부터 인양, 선회(90° 회전), 상차 후 처음 위치로 되돌아오는 일련의 반복적인 작업 과정(0~15초)에 대하여 각 조인트와 실린더에 작용하는 반력과 하중을 평가하기 위하여 굴삭기의 작업자세에 따른 버킷, 암 실린더, 붐 실린더의 변위조건을 사용하여 기구 해석을 수행하였다.

해석결과 가장 작업 빈도수가 많은 최대 굴삭력 자세(P1)에 대하여 시간에 따른 굴삭기 붐, 암 실린더에 작용하는 하중과 조인트에 작용하는 작업반력 분포를 Fig. 5에 나타내었다. 암 실린더보다 붐 실린더에 작용하는 하중에 의해 작업 장치전체가 지지되어 움직이며 실린더를 끌어당기는 힘에 의하여 조인트 1에 반력이 상대적으로 크게 작용함을 알 수 있다.

작업반력은 굴삭반력과 비교하면 작은 값이나 선회시 회전가속도에 의해 작업반력이 비교적 크게 작용하나 상차 후 제자리에 돌아올 때는 흙의 무게 감소로 인하여 선회시 작업반력의 변화는 작다는 것을 알 수 있다. 굴삭작업시 최대 굴삭력 자세, 최대 굴삭반경 자세, 최대 굴삭깊이 자세에 대하여 굴삭기 붐 구조물의 실린더 및 조인트에 작용하는 하중과 굴삭반력, 작업반력을 종합하여 Fig. 6에 나타내었다. 그림에 나타난 바와 같이 작업자세에 관계없이 모두 작업반력보다 굴삭작업시 지반이나 암반의 반력에 의한 굴삭반력이 크게 작용하며, 굴삭 이후 작업과정에서는 선회시 비교적 큰 작업반력이 작용하나 굴삭반력에 비하면 작음을 알 수 있다.

최대 굴삭력 자세, 최대 굴삭반경 자세에서 작용하는 굴삭 및 작업반력은 유사한 분포양상을 나타내나 최대 굴삭깊이 자세에서는 다른 양상을 나타내고 있다. 이것은 작업장치의 초기 설정위치에 의하여 실린더 하중 및 굴삭반력이 크게 작용하여 다른 양상을 나타낸 것으로 작업이 진행됨에 따라 작업반력은 유사한 경향을 나타내는데, 이것은 작업장치의 자중에 의한 영향이 초기에 크게 영향을 미쳐 반력이 서로 다르게 작용하기 때문이다.

즉, 작업장치의 초기 위치에 의하여 최대 굴삭력 자세나 최대 굴삭반경 자세에서는 조인트 1에서 최대 굴삭반력이 작용하지만, 최대 굴삭깊이 자세에서는 붐 실린더를 끌어당기는 하중이 가장 크게 작용하여 결과적으로 조인트 2에 큰 반력이 작용하게 된다. 또한 붐 실린더 하중과 조인트 2에서의 굴삭반력은 유사한 크기 및 분포를 나타내고 있다.

굴삭작업시 각 작업 자세별 굴삭기 구조물의 실린더 및 조인트에 작용하는 최대 하중 및 굴삭반력을 표 1에

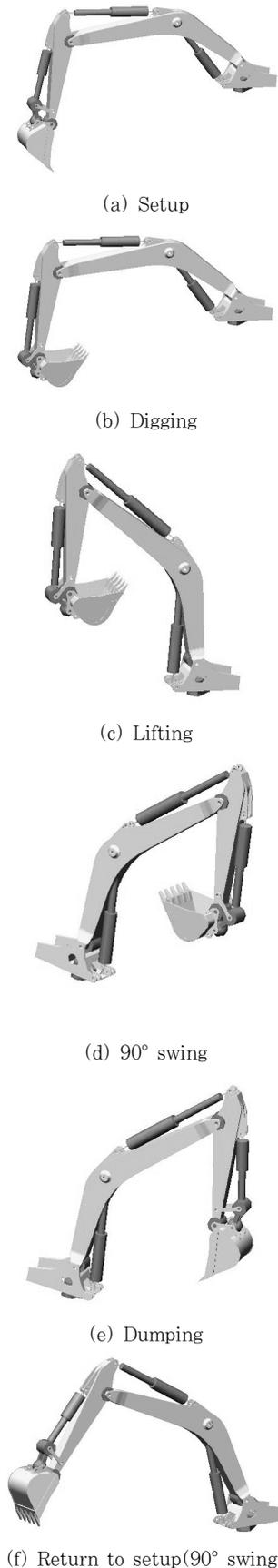


Fig. 4 Excavator working procedure

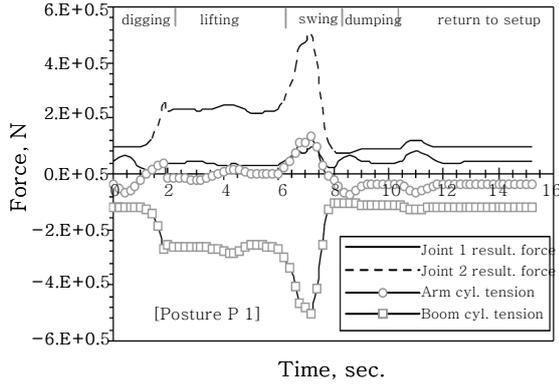
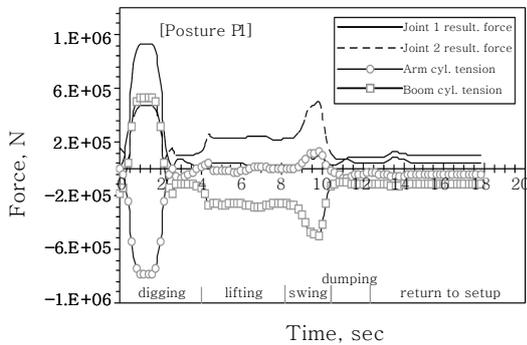
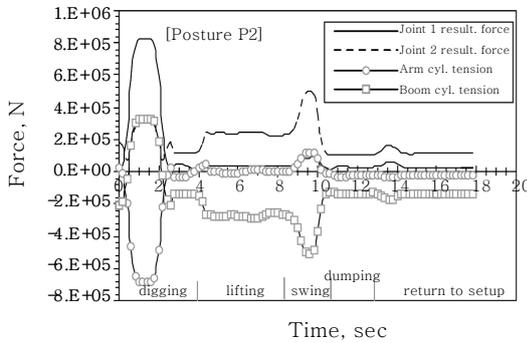


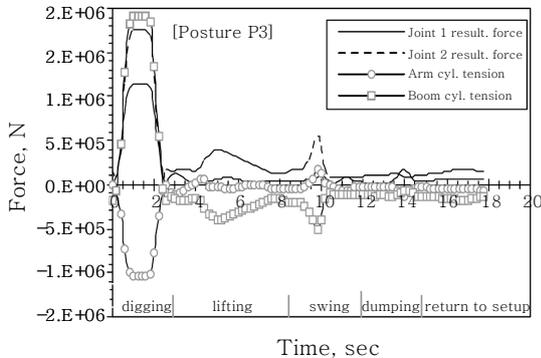
Fig. 5 Reaction force distribution for working posture P1



(a) Max. digging force posture, P1



(b) Max. digging reach posture, P2



(c) Max. digging depth posture, P3

Fig. 6 Reaction force distribution for working posture P1, P2 and P3

Table 1 Max. reaction forces at arm & boom cylinders and joints

	Reaction force, N				
	direction	Joint 1	Joint 2	Arm cyl.	Boom cyl.
P1	X	-920,775	-233,674	-780,784	529,944
	Y	153,981	415,582		
	Z	0	0		
P2	X	-808,708	-103,839	-681,618	328,500
	Y	-158,944	284,431		
	Z	0	0		
P3	X	-1,137,222	-1,369,968	-1,046,109	1,916,204
	Y	-155,650	1,115,086		
	Z	0	0		

나타내었다. 위의 결과를 종합해 보면 실린더 구동력과 조인트 반력은 유사한 분포 양상을 나타내며 결국 조인트에 작용하는 반력은 작업장치의 자중보다는 실린더에 작용하는 하중에 의해 더 큰 영향을 받으며 실린더 구동력을 정확히 평가하는 것이 중요하다는 것을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구는 용접부 피로강도를 고려한 굴삭기 붐 구조물의 내부 형상을 최적화하기 위한 전단계 연구로서, 굴삭기 구동시 발생하는 하중 및 반력을 평가한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 굴삭작업시 지반에 의한 반력에 의하여 굴삭반력은 크게 작용하며 작업에 의한 작업반력은 상대적으로 작다.
- 2) 작업자세에 따른 붐에 작용하는 하중 및 반력을 평가한 결과, 최대 굴삭깊이 자세에서 붐 실린더에 최대 하중이 작용하였다.
- 3) 조인트 1과 조인트 2에는 최대 굴삭깊이 자세에서 굴삭반력이 가장 크며, 최대 굴삭력 자세, 최대 굴삭반경 자세 순서로 굴삭반력이 크다.
- 4) 작업장치의 연결부에서의 반력은 자중보다 실린더 구동력에 의한 영향을 많이 받는다.

후 기

본 논문은 저자가 현대중공업(주) 재직시 수행한 연구과제에 대한 것으로, 연구결과를 학회논문에 게재하도록 허락해 주신 현대중공업(주) 관계자 여러분께 깊은 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

1. Nikraves, P. E. : Computer Aided Analysis of Mechanical Systems, Prentice Hall, 1988
2. Soon Ki Kwon, Hyung Jin Park, Min Suk Suh and Hyung Gun Kim : Development of Simulation System for Front Attachment of Excavator, Journal of KSME, **20-5** (1996), 1401-1410 (in Korean)
3. Wan-Suk, Oe-Jo Kim, Byung-Hoon Lee, Man-Hyung Lee and Kyeong-Hwa Yoon : Dynamic Analysis of an Excavator Using Experimental Data, Journal of KSME, **18-5** (1994), 1150-1157 (in Korean)
4. Oe-Jo Kim, W. S. Yoo, K. H. Yoon and H. G. Kang : Evaluation of Joint Reaction Forces for a Hydraulic Excavator Subjected to a Critical Load, Journal of KSME, **20-4** (1996), 1154-1163 (in Korean)
5. Unpublished Internal Project Report, HMRI-2002-12-S320, 2002 (in Korean)