

용접부 피로강도를 고려한 굴삭기 붐 구조물 설계(Ⅱ)

박 상 철*†

*거제대학 조선과

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

Sang-Chul Park*,†

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

†Corresponding author : scpark@koje.ac.kr

(Received April 5, 2011 ; Revised May 4, 2011 ; Accepted August 4, 2011)

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, multi-body 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 structures with optimum arrangement of diaphragms was proposed. This work mainly consists of the following two parts: part 1 focuses on multi-body 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, Diaphragm, equivalent stress, Loading block, Miner's damage rule

1. 서 론

굴삭기는 산업 건설현장에서 널리 사용되고 있는 대표적인 건설장비로 그 사용 범위가 점차 확대되고 있다. 그러나 굴삭기는 장비 특성상 다양한 작업을 수행하게 되며 그에 따라 복잡한 하중상태에 노출되어 설계 초기단계에서 굴삭기 구조물의 안전성을 정량적으로 평가하고 제품의 신뢰성이 확보되도록 설계하는데 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 발생하고 있는 실정이다.

굴삭기의 작업장치는 버킷(bucket), 암(arm), 붐(boom)으로 구성된 다관절 구조물이며 이러한 작업장치는 버킷 실린더, 암 실린더, 붐 실린더에 의하여 구

동되도록 설계되어 있다. 실제 굴삭작업시 버킷에 작용하는 하중이 작업장치를 구성하는 구조물로 전달되어 암(arm)과 특히 붐 구조물 내부 용접부에 피로파손이 많이 발생한다고 보고되고 있다¹⁾.

붐은 중앙부가 위로 솟아오른 상자형 단면을 갖는 단순한 형태의 구조물로서, 파손 양상을 살펴보면 내부 굽힘강성을 증가시키기 위하여 설치된 다이아프램(diaphragm)과 붐 하부 판을 연결하는 용접부에 균열이 발생하여 하부 판 표면으로 전파하여 최종 파단이 되는 현상이 발생하는 것을 알 수 있다(Fig. 1 참조).

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

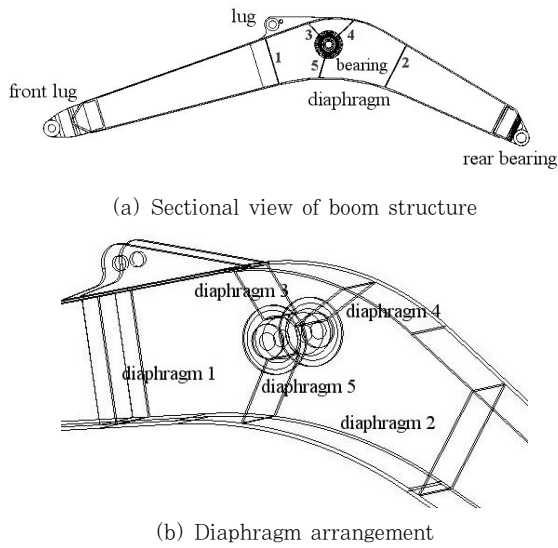


Fig. 1 Configuration of boom structure

2. 붐 구조물 응력해석

2.1 응력해석

굴삭작업시 굴삭기의 붐 조인트에 작용하는 반력은 굴삭자세별 굴삭작업이 진행됨에 따라 그 크기 및 방향이 변화한다. 이러한 작업자세별 반력 분포중에서 최대 굴삭력 자세에 대하여 시간에 따라 변화하는 반력중에서 대표적인 값을 추출하여 Table 1에 나타내었으며²⁾, 이러한 반력이 하중(applied load)으로 작용할 때 붐 구조물에 발생하는 응력 상태를 평가하였다. Table 1에서 joint 1은 붐과 암, joint 2는 붐과 상부 프레임에 연결하는 조인트이다.

붐 구조물의 응력해석은 상업적인 구조해석 전용 프로그램을 사용하여 수행하였다. 굴삭기 전체를 유한요소로 구성하여, 조인트에 작용하는 반력에 의한, 굴삭기의 응답을 평가하는 것이 바람직하나 Fig. 2와 같이 붐 구조물 자체만을 솔리드(solid) 요소를 사용하여 효



Fig. 2 Finite element model of boom structure

율적으로 유한요소 해석모델을 구성하였다. 경계조건은 붐 구조물의 리어 베어링(rear bearing) 부분이 굴삭기 상부 프레임과 연결되어 있어 굴삭 작업시 붐 거동이 상부 프레임에 의하여 회전만 허용되고 연결 조인트의 모든 변위는 구속되는 것으로 하였다.

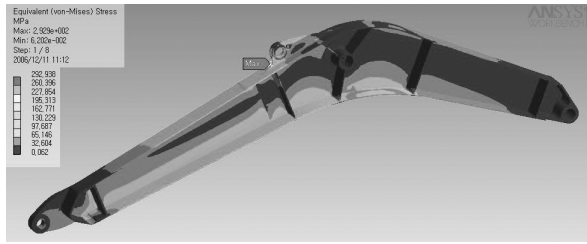
해석결과로 가장 큰 반력성분인 최대 굴삭반력이 작용하는 경우에 각 작업자세에 따라 붐 구조물에 발생하는 상당응력 분포를, 폭의 중심에 대해 대칭이므로 반을 절단한 모습으로 Fig. 3에 나타내었다. 전체적인 응력분포는 서로 크게 다르지 않으며 상당응력 크기는 최대 굴삭력 자세에서 가장 크고 최대 굴삭깊이 자세, 최대 굴삭반경 자세 순으로 작용함을 알 수 있다.

또한 작업자세에 관계없이 최대 상당응력은, 모두 암 실린더에 의한 하중이 작용하는 러그 부근에 발생하고 있음을 알 수 있다. 또한 최대 굴삭력 자세에서 러그 모재 부분에 국부적으로 높은 수준의 상당응력이 발생하였는데 이것은 모델링과정에서 러그에 부착되는 덧판을 해석모델에 포함하지 않는 결과이고 또한 발생 지역이 모재 부분이기 때문에 본 연구에서는 고려할 필요가 없는 부분이다.

피로손상이 자주 발생되는 붐 구조물 하부 판에 대하여 최대 굴삭력 자세에서 최대 굴삭반력 작용시 하부 판 모서리에 작용하는 상당응력 분포를 Fig. 4에 나타내었다. 그림에서 상당응력 분포는 다이아프램 #1과 #2 사이에서 붐 하부 판과 측면 판을 연결하는 용접

Table 1 Reaction forces exerted at boom joint with max. digging force posture

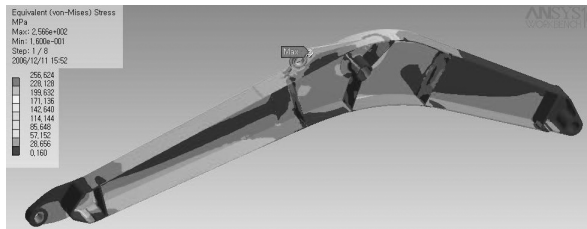
Time (sec)	Joint 1 forces (N)				Joint 2 forces (N)				Arm cyl. force (N)	Boom cyl. force (N)
	Fx	Fy	Fz	F	Fx	Fy	Fz	F		
1.3	-1054193	-183906	-605	1070115	-212437	436385	-2764	485354	-880339	531386
3.22	8743	-21505	120	23214	173244	-117140	1163	209133	6458	-243532
4.08	16093	-20130	122	25772	170088	-117717	1160	206854	10857	-243320
5.34	2461	-52661	242	52719	324974	-227283	2245	396574	-4050	-454189
7.84	47362	-13051	247	49128	132531	-106555	744	170055	13048	-231425
9.58	-124747	-95425	-2127	157074	448463	-265668	5276	521274	-151606	-593773
11.98	59333	1407	10	59350	122936	-93471	961	154438	39129	-202289
13.62	-19805	-36669	6462	42173	346903	-206459	-7668	403765	-18719	-445289



(a) Max. digging force posture(P1)



(b) Max. digging radius posture(P2)



(c) Max. digging depth posture(P3)

Fig. 3 Equivalent stress distribution at boom structure with max. reaction force(MPa)

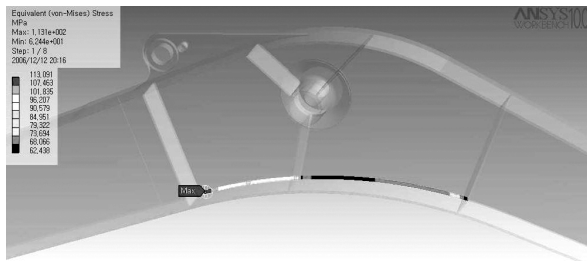


Fig. 4 Equivalent stress distribution at boom structure with max. reaction force for max. digging force posture(MPa)

조인트를 따라 길이방향으로 도시한 결과이며, 예상대로 다이아프램 #1과 붐 하부 판이 만나는 모서리에 가장 큰 상당응력(113.1MPa)이 발생하였으며 오른쪽으로 이동할수록 응력이 감소하는 경향을 보인다는 것을 알 수 있다.

이와 같이 각 작업자세별 굴삭작업시 붐 구조물 조인트에 작업이 진행됨에 따라 Table 1과 같은 반력이 작용할 때 이에 대한 붐 구조물의 응력상태를 평가하였으며, 그 해석결과로 붐 구조물 하부 판 모서리에 발생하는 최대 상당응력을 각각의 경우에 대하여 Table 2에 정리하여 나타내었다. 표에 나타난 바와 같이 피로손상

Table 2 Max. equivalent stress at inner bottom plate of boom structure

Max. digging force posture, P1		Max. digging radius posture, P2		Max. digging depth posture, P3	
Time (sec)	Eq. stress (MPa)	Time (sec)	Eq. stress (MPa)	Time (sec)	Eq. stress (MPa)
1.3	113.1	1.3	92.9	1.3	65.6
3.22	17.9	3.3	17.4	3.08	25.9
4.08	17.0	5.1	30.5	5.08	56.2
5.34	33.1	6.08	36.7	6.46	37.4
7.84	12.0	7.34	5.7	7.92	5.5
9.58	60.2	9.62	61.1	9.56	60.9
11.98	10.0	13.52	42.8	13.54	37.9
13.62	39.9	16.08	19.1	16.76	31.7

이 주로 발생하는 붐 하부 판에 작용하는 상당응력은 최대 굴삭력 자세에서 가장 크고 최대 굴삭반경 자세, 최대 굴삭깊이 자세 순으로 작용함을 알 수 있다.

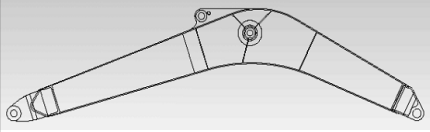
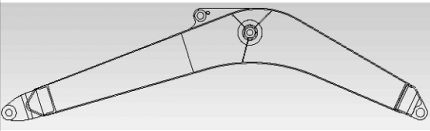
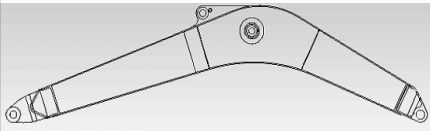
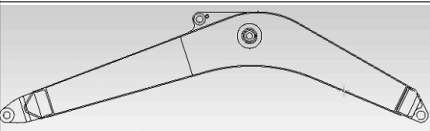
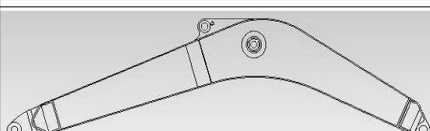
2.2 붐 구조물 내부 형상 최적화

붐 구조물의 굽힘 강도를 보강하기 위하여 붐 내부에 설치되어 있는 다이아프램의 설치 개수를 축소하거나 설치위치 변경을 통하여 기존의 붐 구조물 강성을 유지하는 전제조건하에 내부 형상 최적화를 수행하였다.

예비연구로 다이아프램 설치 유, 무 및 설치위치 변경에 따른 수많은 형상 최적화 모델에 대하여 구조해석을 수행하였으며 그 중에서 대표적인 형상 최적화 모델에 대하여 구조물의 중량 감소량 및 Fig. 1의 다이아프램 #1, #2 사이 붐 하부 판에 작용하는 최대 상당응력 크기를 Table 3에 정리하여 나타내었다.

본 연구에서 형상 최적화의 기준으로 사용되고 있는 A type은 기존 형상이며(Fig. 1), 암 실린더를 붐에 연결하는 리그 부분과 붐 실린더를 붐에 연결하는 베어링 부분의 강도를 충분히 보강하기 위하여 붐 내부 좌, 우측에 각각 1개, 중앙부 베어링 부근에 3개, 총 5개의 다이아프램이 부착된 구조로 되어 있다. 이러한 다이아프램은 설치 장소가 협소하여 용접시공이 어렵게 되어 용접 후 결함발생 확률이 높아지므로 용접부 품질 및 생산성 향상을 위하여 내부 형상을 변경할 필요가 있다. 개선형상인 B type은 A type에서 좌, 우측 다이아프램 2개를 제거하여 베어링부근에 3개의 다이아프램만을 설치한 형상이며, 개선형상 C type은 좌, 우측 다이아프램은 그대로 두고 붐 구조물 중앙부에 설치된 3개의 다이아프램을 제거한 경우이다. 개선형상 D

Table 3 Max. equivalent stress at inner bottom plate of boom structure with model types

Model type	Boom structure configuration	Boom weight (kg)		Max. equiv. stress (MPa)		
		total weight	weight reduction	P1	P2	P3
A		2,325	-	113.1	92.8	65.5
B		2,286	39	142.8	113.5	86.8
C		2,292	33	110.0	90.6	69.0
D		2,253	72	147.6	117.9	87.2
E		2,273	52	112.9	91.3	67.7

type은 5개의 다이어프램을 전부 제거한 붐 구조물이며, E type은 상당응력이 증가하는 리그부 밑에 1개의 다이어프램만을 부착한 경우이다.

주요 관심부분인 붐 하부 판에 작용하는 상당응력은 붐 구조물 내부 형상에 따라 서로 다른 양상을 나타내는 것을 알 수 있다. 개선형상 C type은 기존형상 A type에 비하여 최대 굴삭깊이 자세를 제외하고 붐 하부 판에 작용하는 상당응력의 증가는 거의 없고 추가적으로 중량 감소 및 생산공수 절감 효과를 얻을 수 있음을 알 수 있다. 그러나 D type의 경우 중량감소 및 생산공수 절감 효과는 크나 전체적으로 상당응력이 크게 증가하여 다이어프램 제거로 인한 붐 구조물의 굽힘 및 비틀림강성 저하로 인하여 리그가 부착된 상부판에 국부적인 좌굴 발생 및 모재 파손이 우려된다.

개선형상 E type은 리그가 부착된 붐 상부 판의 국부적인 좌굴방지와 리그부에 발생하는 응력집중을 완화시키기 위하여 상당응력이 증가하는 리그부 밑에 다른 모델보다 판 두께를 증가시킨 1개의 #1 다이어프램만을 부착한 경우이며, 최대 굴삭력 자세에서 최대 굴삭반력 작용시 붐 구조물 전체에 작용하는 상당응력 분포를 Fig. 5, 붐 하부 판 모서리에 작용하는 상당응력 분포를 Fig. 6에 나타내었다. 그림과 같이 붐 구조물에 작용하는 응력수준은 기존 모델보다 증가하는 경향을

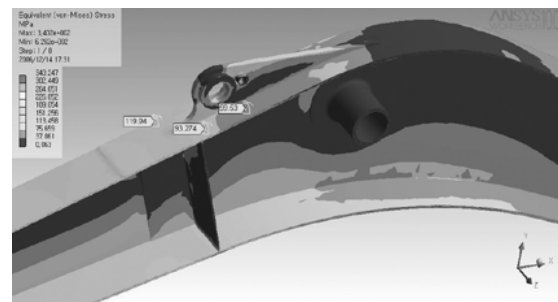


Fig. 5 Equivalent stress at boom structure with max. reaction force for max. digging force posture(P1, MPa)

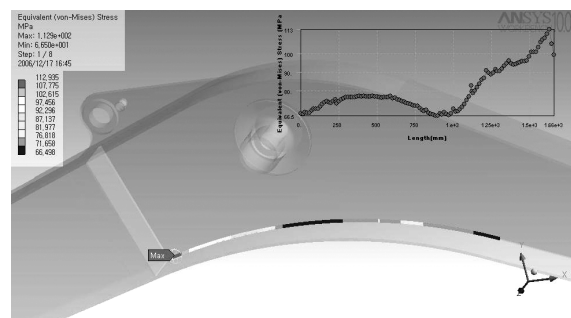


Fig. 6 Equivalent stress at the corner of boom structure with max. reaction force for max. digging force posture(P1, MPa)

나타내었으나, 내부 다이아프램과 하부 판 이음부에는 기존형상과 유사한 상당응력 분포를 나타낸다는 것을 알 수 있다.

3. 피로해석 및 고찰

붐 구조물의 파손 양상은 대부분 붐 내부 상, 하부 판과 양쪽 측면 판 사이에 설치된 다이아프램 용접부에서 균열이 발생하여 피로파손이 발생하고 있으며, 산업 현장의 파손사례에 의하면 주로 하부 판의 내부 용접부 토우(toe)에서 균열이 발생한 후 하부 판 외부 표면으로 진전하여 파손이 발생한다고 보고되고 있다.

굴삭기의 초기 설계단계에서 사용기간 동안 붐 구조물의 신뢰성을 확보하기 위하여 피로강도를 평가하였다. 굴삭기의 굴삭작업시 붐 구조물 내부 용접부에 대한 피로강도를 평가하기 위하여 내부 하부 판에 작용하는 핫스팟 응력(hot spot stress)을 사용하였으며³⁻⁵⁾ 피로수명은 국제용접협회(IIW)에서 추천하는 FAT100 선도 $N=C/S^m$, $C=2.0 \times 10^{12}$, $m=3$ (N: 피로수명, S: hot spot stress) 식을 사용하여 평가하였다^{6,7)}.

우선 용접부에 동기력(driving force)으로 작용하는 하중 블록(loadung block)을 각 작업 자세별 1회 굴삭 작업시 작업시간 경과에 따라 발생하는 최대 상당응력을 기준으로 Fig. 7과 같이 작성하였으며, 이러한 하중 블록이 반복적으로 용접부에 작용할 때 아래의 식 (1)의 Miner 손상법칙(Miner's damage rule)을 사용하여 붐 구조물 내부 하부 다이아프램 용접부의 피로수명을 평가하였다⁸⁾.

$$D = \sum_1^i \frac{n_i}{N_i} \tag{1}$$

굴삭기가 최대 굴삭력 자세, 최대 굴삭반경 자세 그리고 최대 굴삭깊이 자세로 각 1회 굴삭 작업을 한 경우에 각각의 작업 자세에 대하여 형상 최적화 기준 모

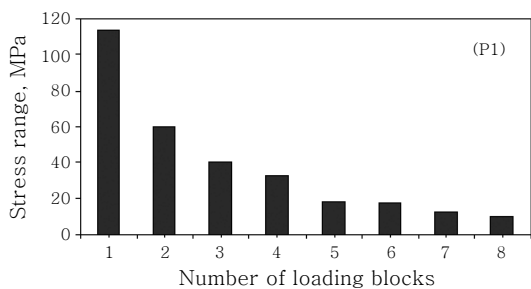


Fig. 7 Loading block by 1 working cycle (max. digging force posture)

Table 4 Fatigue life evaluation of type A model with 3 working postures

Posture	Fatigue damage	Fatigue life N_f (cycle)	Damage ratio(%)
Max. digging force posture(P1)	8.89E-07	1,124,848	46.6
Max. digging radius posture(P2)	5.99E-07	1,670,808	31.4
Max. digging depth posture(P3)	4.21E-07	2,377,221	22.0

델 A type에 대한 피로수명 평가 결과를 Table 4에 나타내었다. 피로손상률은 $1/N_f$ (N_f : 전체 피로수명)로서 전체 피로수명에 대한 1회 굴삭작업에 의한 피로수명의 비율을 뜻하며, 피로수명은 피로파손이 발생할 때까지의 소요되는 기간을 의미한다. 손상비율은 3가지 자세에 의한 손상률을 합한 전체 피로손상률에서 해당 피로손상률이 차지하는 비율로서 3가지 자세 중 최대 굴삭력 자세의 경우 46.6%로 붐 하부 용접부에 가장 큰 피로손상을 야기하며 최대 굴삭반경 자세에서 31.4%, 최대 굴삭깊이 자세에서 22% 비율로 피로손상을 발생시킨다는 것을 알 수 있다.

붐 구조물 하부 판에 가장 큰 피로손상을 야기하는 최대 굴삭력 자세에 대하여, 여러 종류의 붐 구조물 내부 형상에 따라 붐 하부 판 다이아프램 용접부에 작용하는 하중 블록에 의한 피로수명을 평가하였으며 그 결과를 Table 5, Fig. 8에 나타내었다.

표에 나타낸 바와 같이 기존형상 A type과 비교하여 C, E type이 피로수명이 비슷하나 제작시 생산성을 고려하면 E type이 대안이 될 수 있음을 알 수 있다. 즉, 붐 구조물 모델 타입에 따라 피로수명에 차이가 발생하고 있으며 이러한 피로수명의 차이는 용접부에 피로균열을 발생시키는 작용 응력의 차이에 의한 것임을 알 수 있다. 응력해석 결과에서 여러 종류의 붐 구조물

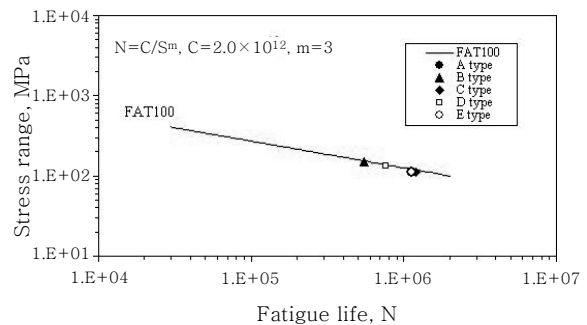


Fig. 8 Fatigue life evaluation of 5 types of boom structures

Table 5 Fatigue life evaluation of 5 types of boom structures

Model type	Fatigue damage	Fatigue life Nf (cycle)	Damage ratio(%)	
Max. digging force posture (P1)	A	8.89E-07	1,124,848	14.8
	B	1.624E-06	615,649	27.0
	C	8.29E-07	1,205,716	13.8
	D	1.779E-06	561,917	29.6
	E	8.847E-07	1,130,326	14.7

내부 형상은 기존형상의 붐 구조물과 비교하여 전체적으로 상당응력이 증가하는 경향을 나타내지만, 하부 판에는 내부 형상에 따라 상당응력 분포가 다른 경향을 나타낸다는 것을 알 수 있다.

즉, 붐 구조물 내부 형상에 따라 다이어그램 용접부에 작용하는 등가응력 크기가 기존형상과 비교하여 작은 값으로 작용한다면 결과적으로 피로수명이 증가하고 피로손상률, 손상비율이 감소하게 된다는 것을 알 수 있다.

따라서 초기 기본설계과정에서 붐 구조물 내부 형상 변경을 통하여 하부 판 다이어그램 용접부에 동일한 피로수명을 갖고 붐 구조물의 경량화 및 생산성 향상을 이룰 수 있는 새로운 붐구조물을 설계하는 것이 가능하다는 것을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구는 굴삭기 구동시 발생하는 하중 및 반력으로 부터 용접부 피로강도를 고려한 붐 구조물의 내부 형상을 최적화하기 위한 연구로서, 응력해석 및 피로수명 평가를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 굴삭작업시 최대굴삭력 자세, 최대 굴삭반경 자세, 최대 굴삭깊이 자세 순서로 붐 구조물에 피로손상이 발생한다.

2) 붐 구조물 내부 형상 변경을 통하여 기존 형상 모델과 피로수명은 동일하며 경량화 및 생산성 향상을 이룰 수 있는 새로운 붐 구조물 내부 형상을 제안하였다.

3) 굴삭기의 초기 설계과정에서 기구해석과 응력해석, 피로강도 평가를 통하여 붐 구조물의 신뢰성을 확보하기 위한 설계절차를 정립하였다.

후 기

본 논문은 저자가 현대중공업(주) 재직시 수행한 연구 과제로 연구결과를 학회논문에 게재하도록 허락해 주신 현대중공업(주) 관계자 여러분께 깊은 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

1. Internal Technical Report : Failure Analysis of Weldment for Excavator, December 2005
2. S. C. Park : Design of Excavator Boom Structure Based on Fatigue Strength of Weldment(I), Journal of KWJS, **28-5** (2010), 58-63 (in Korean)
3. P. Dong : A Structural Stress Definition and Numerical Implementation for Fatigue Analysis of Welded Joints, International Journal of Fatigue, **23** (2001), 866-876
4. E. Niemi : Designer's Guide for Hot Spot Fatigue Analysis, XIII-WG3-06-99, May 2000P
5. Commission of Structural Strength of Welded Structures : General Guide for Hot Spot Stress Analysis, Journal of KWJS, **23-6** (2005), 18-28 (in Korean)
6. A. Hobbacher : Fatigue Design of Welded Joints and Components, XIII-1539-96/XV-845-9, Abington Publishing
7. Classification Notes No.30.7 : Fatigue Assessment of Ship Structures, DNV, July 2005
8. T. R. Gurney : Fatigue of Welded Structures, Cambridge University Press, 1979