

# Built-up box의 구조 형상 최적화를 위한 강성 평가 시스템 Stiffness Evaluation System to Optimize Structural Shape of Built-up Box

고성훈\*, 이희태, 신상범

현대중공업 (주) 기술개발본부 산업기술연구소

## 1. 서론

최근 굴삭기의 대형화 및 고성능화 그리고, 내구성의 향상과 함께 다양한 작업 조건에 효율적인 운전 특성을 확보하기 위한 작업 장치의 구조 형상 최적화를 위한 많은 연구가 수행되고 있다[1,2]. 특히 작업 장치의 구조 형상은 굴삭기의 작업 반경과 굴삭력등 작업 효율성을 좌우하므로 이의 형상 최적화를 위한 설계 기술의 확보는 매우 중요하다. 그러나 기존의 유한 요소 해석을 이용한 작업 장치에 대한 설계는 주로 3차원 shell과 solid 요소를 이용하여 각 작업 장치에 대한 구조 형상을 구성하고, 이를 이용하여 강도 및 강성 평가를 수행한 후 국부적인 응력 평가를 통하여 정적 및 동적 내구성을 평가하는 순으로 진행되어 왔다. 그러나, 구조 형상의 모델링시 상당한 설계 비용이 소요됨으로써 초기 구조 변수에 대한 평가는 매우 제한적이었던 것이 사실이다. 즉, 기존의 연구 결과는 주로 국부적인 응력 개선 방안에 집중되어 왔다[3].

본 연구에서는 굴삭기의 작업 장치의 하나인 붐(boom)의 초기 구조 형상을 최적화하기 위하여 구조 변수에 따른 강성 평가 시스템을 구축하고자 하였다. 이를 위하여 기존의 3차원 shell 및 solid 요소를 이용하여 굴삭기 붐에 대한 응력 해석을 수행하고, 이를 각 구조 부재에 대한 등가 빔 요소를 이용한 해석 결과와 비교함으로써 타당성을 검증하였다.

## 2. 유한 요소 해석

### 2.1 해석 모델 및 방법

굴삭기는 다관절의 작업 장치와 차체로 구성되며, 본 연구의 해석 모델인 붐은 암과 버킷을 하부 프레임과 연결 및 작업 하중의 지지 역할을

수행한다. 붐의 주요 구조 부재는 Fig. 1과 같이 암과의 연결을 위한 선행 러그(front lug), 차체와의 연결을 위한 후 베어링(rear bearing), 붐 실린더와의 연결 및 지지를 위한 붐 베어링과 내부 보강재(diaphragm) 그리고, 외판으로 구성되어 있다. 이들 구조 부재중 붐의 형상 최적화를 위한 구조 형상 변수를 선정하기 위하여 먼저 각 구조 부재의 유무에 따른 응력 특성을 평가하였다. 이때, 사용된 해석 모델의 형상은 Fig. 1과 같다.

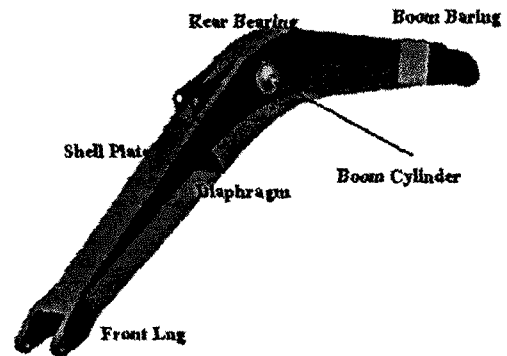


Fig. 1 Schematic diagram of boom

해석시 사용된 요소망은 Fig. 2의 (a)와 같이 붐의 외판은 shell 요소, 붐의 선행 러그부와 베어링부에 위치한 주강품은 사면체의 3차원 solid 요소로 구성하였다. 그리고, 응력 및 변형 평가를 위하여 사용된 하중 및 변위 경계조건은 Fig. 2의 (b)와 같이 일정 크기의 축 하중 및 비틀림 모멘트가 선행 러그에 작용하는 것으로 가정하고, 후 베어링 편부에 위치한 절점의 변위는 완전 구속하였으며, 붐 베어링 편에 위치한 절점 변위는 붐의 실린더와 동일한 방향의 변위를 구속하였다.

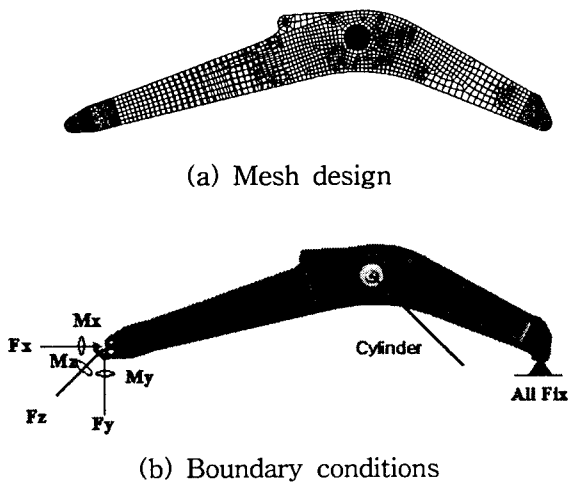


Fig. 2 Mesh design and boundary conditions used for FEA

2.2 해석 결과

Fig. 3은 일정 축하중이 작용하는 경우 굴삭기 붐에 작용하는 최대 등가 응력 분포를 도시한 것이다. Fig. 3의 (a)와 (b)에 도시한 바와 같이 X와 Y축 방향의 일정 축 하중이 작용하는 경우 최대 등가 응력은 후 베어링이 위치한 외판의 상부 및 하부에서 발생하는 반면에 Fig. 3의 (c)와 같이 Z축 일정하중의 경우 붐 베어링부에서 최대 응력이 발생하고 있다. 이때, 동일 크기의 하중하에서 붐에 발생하는 최대 응력은 X, Y 그리고, Z축 방향의 하중 순으로 증가한다. 이러한 각 축 하중에 따른 응력 수준의 차이는 각 하중의 축 방향의 분력에 따른 굽힘 하중의 크기와 붐의 형상에 따른 모멘트 암(moment arm)의 길이와 굽힘 강성의 차에 기인한 것이다. 그리고, 이는 굴삭기 붐의 작업 특성을 고려할 때, X와 Y 축 방향의 하중에 대해 우수한 강성을 갖도록 설계되어 있기 때문이다.

Fig. 4는 일정 축 방향 비틀림 모멘트가 작용하는 경우 굴삭기 붐에 작용하는 최대 등가 응력 분포를 도시한 것이다. 일정 비틀림 모멘트에 의해 작용하는 최대 등가 응력은 하중의 작용 방향과 관계없이 모두 비틀림 강성이 가장 취약한 부분인 선행 러그가 부착된 붐의 외판에서 발생하였다. 이는 축 방향 하중이 작용하는 경우 최대 응력 및 변형량은 하중의 작용점과의 거리에 비례하여 증가하지만, 비틀림 모멘트가 작용하는 경우 응력 및 변형 거동은 붐의 구조 강성의 크

기에 의존하기 때문이다. 비틀림 모멘트가 작용하는 경우 굴삭기 붐 베어링 내부 보강재의 유무에 따른 응력 및 변형량의 차이는 축 방향의 하중에 의한 경우보다 더 감소하게 된다. 이상의 응력 해석 결과로부터 굴삭기 붐의 구조 강도 특성은 붐의 구조 강성과 형상에 의존함을 알 수 있다.

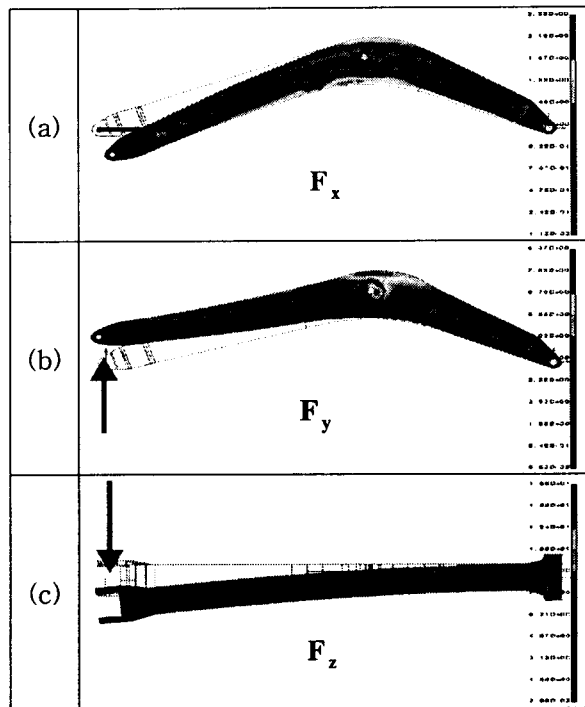


Fig. 3 Contours of equivalent stress at the boom of excavator with axial load

3. 강성 설계 시스템 개발

굴삭기 붐의 형상의 유연성을 확보하고 보다 효율적인 설계를 위해서 붐의 구조 강성 평가 시스템(BSC, Boom Stiffness Calculator)을 등가 빔 요소를 이용하여 개발하였다. 사용된 보 요소는 인장 및 압축, 전단, 굽힘, 비틀림 등의 거동에 대한 강성을 갖도록 정식화(Timoshenko beam theory) 하였다[4]. 그리고, 사용자의 편의성을 향상시키기 위하여 GUI 기반의 전·후 처리 시스템을 탑재하였다. 개발된 강성 평가 모델의 타당성은 Fig. 5와 같이 붐의 각도에 따라 shell 및 solid 요소를 이용하여 요소망을 구성하고, 상용 구조 해석 프로그램을 이용한 해석 결과와 비교하여 검증하였다. 이때, 사용된 하중 및 경계 조건은 Fig. 5와 같다.

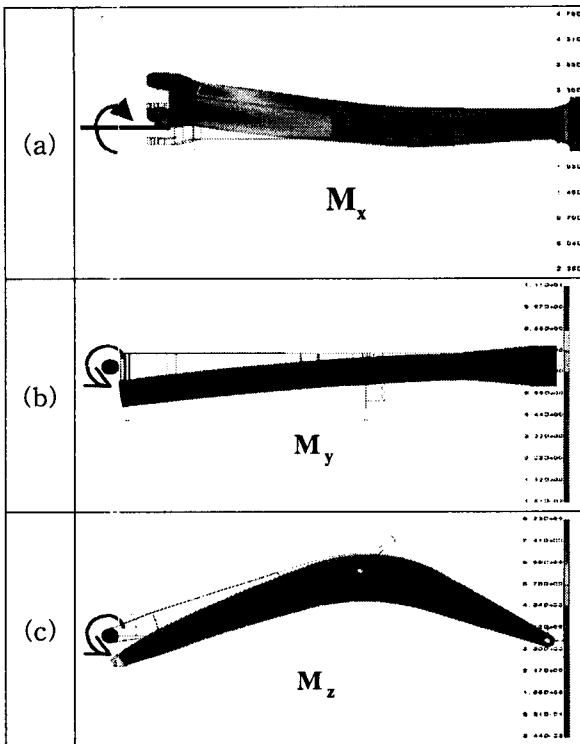


Fig. 4 Contours of equivalent stress at the boom of excavator with twisting moment

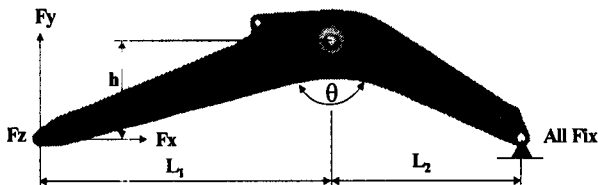


Fig. 5 Analysis variables and boundary condition

Table 1은 일정 축 하중이 작용하는 경우 본 연구를 통하여 제안된 등가 보 요소를 이용한 붐의 강도 평가 시스템에 의한 해석 결과와 기존의 shell과 solid 요소를 이용한 요소망과 상용 프로그램을 이용한 해석 결과를 비교하여 도시한 것이다. 여기서, 붐의 주강품 즉, 선행 리그와 붐 베어링은 중실형 빔으로, 외판의 경우 중공형 빔으로 등가하였다. Table 1과 같이 등가 빔 요소를 이용한 설계 시스템의 계산 결과와 기존의 shell 및 solid를 이용한 해석 결과가 매우 잘 일치하고 있다. 따라서 등가 보 요소 모델을 이용한 설계 시스템의 개발을 통하여 붐의 최적 형상 설계의 효율 향상을 기대할 수 있다.

Table 1 Comparison of the maximum distortion at the boom obtained from equivalent beam model and shell & solid model

$\theta$	Analysis Method	Max. Displacement [mm]		
		$F_x$	$F_y$	$F_z$
120°	Equiv. Beam	6.1	29.7	43.6
	Shell & Solid	6.1	26.3	43.6
138°	Equiv. Beam	4.4	30.1	42.0
	Shell & Solid	4.7	29.5	43.8
150°	Equiv. Beam	3.5	34.9	41.1
	Shell & Solid	3.7	31.7	43.9

#### 4. 결 론

굴삭기의 작업 장치인 하중 전달형 built-up box인 붐의 설계 유연성을 향상시키고자 shell과 solid를 요소를 이용한 요소망을 이용하여 응력 특성을 평가하였다. 그리고, 이 결과를 토대로 본 연구에서는 등가 보 요소를 이용하여 붐의 구조 부재의 형상에 따른 GUI 기반의 강성 평가 시스템을 개발하고, 이의 타당성을 검증하였다.

#### 참고문헌

1. Y. Higashida, Y. Makino and M. Hashimoto : Operational Stress Measurement and Fatigue Life Assessment For Hydraulic Excavators, Fatigue Prevention and Reliability, ASME, (1983), 21-26
2. 김규성, 정준모, 장영식, 최익홍, 이준희 : 굴삭기의 정적/동적 응력 및 구동 특성 계측, 대한기계학회 춘계 학술대회 논문집, (2003), 473-478
3. Z. Yang : An Integrated FEA Based Procedure for Weld for Fixture Design, Cinf ICCTW(11th) Proceeding, pp203-211
4. 강보영 외 17 : MIDAS GEN User's Manual Volume I, 1998