

레벨 러핑 크레인 붐에 대한 구조설계의 건전성 평가

김민생* · 이재철* · 정석용* · 안성훈* · 손지원** · 조광제** · 송철기† · 박실룡*** · 배태한***
(2007년 11월 27일 접수, 2008년 4월 28일 심사완료)

Structure Evaluation for the Level Luffing Crane' Boom

Min-Saeng Kim, Jae-Chul Lee, Suk-Yong Jeong, Sung-Hoon Ahn, Jee-Won Son,
Kwang-Je Cho, Chul Ki Song, Sil Ryong Park and Tae-Han Bae

Key Words : Finite Element Method(유한 요소법), Level Luffing Crane(레벨 러핑 크레인), Boom(붐), Wind Load(풍하중), Luff Rope Element(러프 로프 요소)

Abstract

Structure evaluation for 70/15 T×105 m LLC(Level Luffing Crane)'s boom was conducted by Finite Element Method. Boom modeled with beam element was fixed by luff rope and boom mount and was received loads from self weight, luff hoisting, traveling motion, slewing motion, and wind force, etc. These applied loads were calculated using various factors presented in the reference standards and were inputted in the analysis model after considering about the adverse conditions of LLC. In the research, deformation, stresses, buckling of boom were evaluated by ANSYS. Structural safety of boom was confirmed in the results of numerical analysis.

기호설명

K	: 후크의 하중조건, 하중횟수에 따른 효율 계수(duty factor)
Ψ	: 리프트 작동에 의한 발생하는 충격계수 (impact factor)
F_i	: 관성력(N)
W_i	: 호이스팅 하중과 구성품 질량(kg)
G	: 중력 가속도(m/s ²)
Q	: 풍하중에서의 속도압(N/m ²)
C	: 풍력계수

A	: 파이프의 단면적(m ²)
β_{TL}	: 주행(Traveling)시 발생하는 관성력에 의한 계수
β_{SL}	: 선회(Slewing)시 발생하는 관성력에 의한 계수
V_m	: 이동 속도 (m/s)
DX, DY, DZ	: 글로벌 좌표축(X, Y, Z축)으로의 변위
MX, MY, MZ	: 글로벌 좌표축(X, Y, Z축)으로의 모멘트
W	: 풍하중이 작용하는 조건
NW	: 풍하중이 작용하지 않는 조건

† 책임저자, 회원, 경상대학교 기계항공공학부, 공학연구원

E-mail : cksong@gnu.kr

TEL : (055) 751-6074, FAX : (055) 757-5622

* 서울대학교 기계항공공학부

** 경상대학교 기계항공공학부

*** ㈜CTC 기술부

1. 서론

우리나라 조선산업은 2000년 이후 LNG선, 초대형 컨테이너선 등 고수익 선종의 대량수주에 힘입어 세계 전체 발주물량의 40% 이상을 수주하고 있으며, 명실 공히 세계 1위 조선국가로 군림하고 있다. 이러한 우리나라 조선산업의

비약적 발전과 더불어 해양 구조물과 선박의 대형화 추세에 따라 고생산성과 부가가치 창출을 위한 대형 특수 크레인(Goliath Crane, Level Luffing Crane)의 수요 역시 증가하고 있다. 본 연구는 대형 선박 건조를 위해 특수 크레인 전문기업인 C사에서 설계, 제작한 정격하중 70톤, 작업반경 105m인 대형 크레인(이하, 70/15TON×105M LLC) 구조물의 붐(boom)에 대한 설계 건전성을 평가하기 위하여 수행되었다.

고정식 타워 크레인의 일종인 70/15TON×105M LLC는 중앙부에 위치한 타워(tower)에 회전부인 회전기어(slewing gear)와 주행부인 로커(rocker)가 부착되어 회전운동(slewing)과 주행운동(traveling)을 하면서 붐 호이스팅(hoisting) 작업이 가능하도록 제작된 크레인이다.^(1,2) 크레인의 경우 다양한 작업하중 환경에서의 구조 안전성이 보장되어야 하기에 관련 규격⁽³⁻⁵⁾ 등을 통해서 안전성 평가를 위한 절차와 방법이 제시되어 있으나, 제작되는 크레인 구조물의 대형화 및 주변환경의 복잡화로 평가에 제한을 받고 있다. 대안으로 국내에서도 유한요소법(FEM)을 이용한 안전성 평가방법이 도입하고 있으나, 아직은 크레인 제어부 설계 및 부분품 해석에 주로 이루어지고 있으며 전체 구조물에 대한 좌굴, 변형, 응력 및 진동 등의 전반적인 안전성 평가적용은 미비한 실정이다.⁽⁶⁻⁸⁾ 이에 본 연구에서는 유한요소법에 의한 적용 범위를 확대하고자 작업이 이루어지는 실제 크레인 붐을 모델링하고, 하중 및 경계 조건을 부여하여 해석을 진행함으로써, 붐 구조물의 전체 설계 안전성을 평가하였다.

2. 70/15TON × 105M LLC 구조

2.1 전체 LLC 구조

70/15TON×105M LLC는 호이스팅 작업을 담당하는 붐(boom)과 구조물의 주요 하중을 지지하는 주 구조물(main structure), 그리고 주행을 담당하는 로커로 나눌 수 있다. 또한, 주 구조물은 붐과 연결되는 A-구조물(A-structure), 드림 등의 각종 기계장치가 위치한 기계관(machinery deck), 회전을 담당하는 회전기어(slewing gear) 및 하중을 지지부인 타워, 거더(girder), 다리(leg) 등으로 이루어져 있으며, 전체적인 구조는 Fig. 1과 같다.

2.2 붐 구조

70/15TON×150M LLC에 사용되는 붐은 약 620여 개의 파이프와 앵글 등으로 구성된 구조물로서

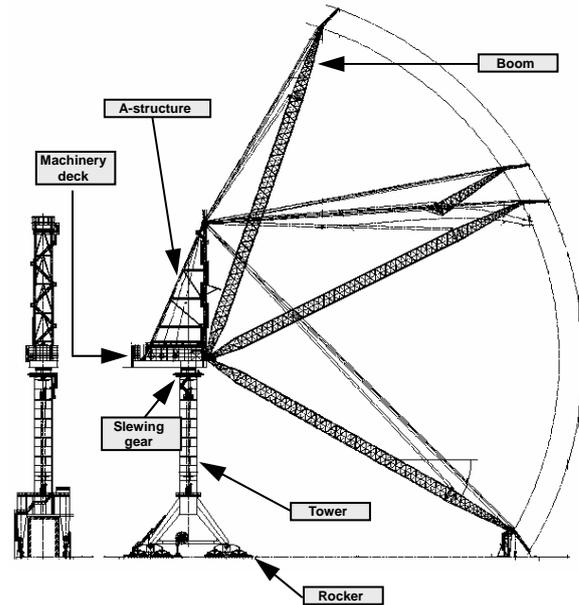


Fig. 1 70/15TON × 105m LLC structure

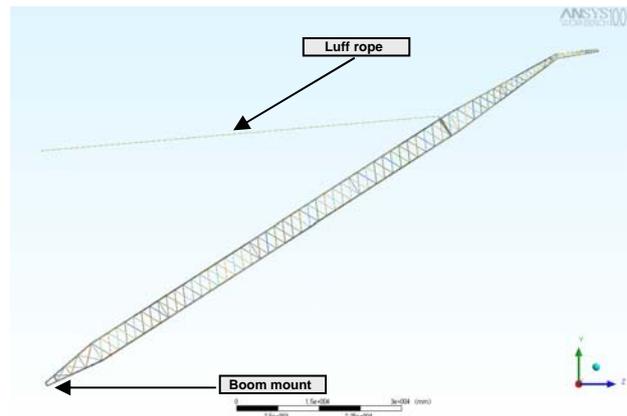


Fig. 2 Boom structure with luff rope

Fig. 2에서와 같이 하부는 붐 마운트에 의해서 주 구조물 기계관의 전방 힌지부와 좌우 2곳에서 연결되어 있고, 상부는 케이블 요소인 러프로프(Luff rope) 2개에 의해서 A-구조물의 탑블록(Top block) 부와 연결되어 있다.

3. 해석 절차

70/15TON×150M LLC의 구조물을 해석함에 있어서, 3차원 CAD(Computer-Aided Design) 프로그램인 CATIA를 이용하여 1차 모델링을 수행하였고, 이를 ANSYS Workbench V.10에서 불러들여서 최종적인 빔 요소(beam element)로 완성하였다. 또한, 비선형 요소인 붐의 러프

Table 1 Analysis cases of 70/15Ton×150M LLC

	CASE	slewing angle	radius (m)	load (ton)	boom angle	wind direction
Long term	1	90-42M×70TON-NW	90°	42	70	71° ×
	2	90-60M×60TON-NW	90°	60	60	61° ×
	3	90-99M×35TON-NW	90°	99	35	33° ×
	4	90-105M×25TON-NW	90°	105	25	27° ×
Mid. term	5	90-42M×70TON-W	90°	42	70	71° side
	6	90-60M×60TON-W	90°	60	60	61° side
	7	90-99M×35TON-W	90°	99	35	33° side
	8	90-105M×25TON-W	90°	105	25	27° side
Short term	9	0-Rest×no Load-0W	0°	-	0	-30° front
	10	0-Rest×no Load-90W	90°	-	0	-30° side
Remark	* slewing angle: angle between boom and tower radius: from tower center to boom end load: operating load in the main hook boom angle: angle between boom and earth					

Table 2 Load conditions of 70/15Ton×150M LLC

	SW	Load	SW-TL	Load-TL	SW-SL	Load-SL
Long	K	$K \times \psi$	$K \times \beta_{TL}$	$K \times \beta_{TL}$	$K \times \beta_{SL}$	$K \times \beta_{SL}$
Mid	K	$K \times \psi$	$K \times \beta_{TL}$	$K \times \beta_{TL}$	$K \times \beta_{SL}$	$K \times \beta_{SL}$
Short	1	-	-	-	-	-
Travel	1		0.05			
Remark	* K : 1.08, ψ : 1.1, β_{TL} : 0.044, β_{SL} : 0.018~0.071					

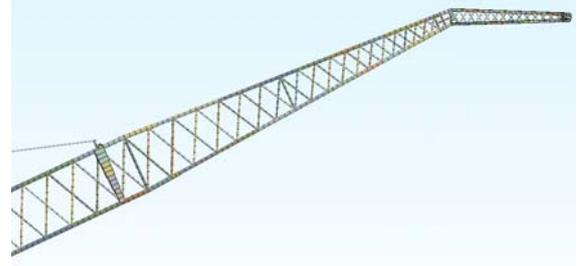
로프를 구현하기 위해서 ANSYS Classic V. 9도 같이 사용하였다.

4. 해석 일반

4.1 해석 조건

70/15TON×150M LLC는 붐과 주 구조물이 이루는 각도, 붐 반경, 후크 작업하중 및 풍압 조건에 따라서 많은 조건으로 나눌 수 있으나, 본 연구는

그 중에서 대표적인 약조건을 선택하여 해석을 진행하였으며, 각 조건들은 Table 1에 명시된 기준에 의해서 분류하였다. 또한, 풍하중이 없는 경우는 장기(long term), 20 m/s 풍속에 의한 풍하중이 있는 경우는 중기(mid term), 56 m/s의 풍하중(태풍시)이 있는 경우는 단기(short term)로 나누었으며, 조건별로 허용응력을 규격에 의거하여 적용하였다. 추가적으로 붐과 타워 사이의 각도가 59°인 조건하에서의 장기 및 단기조건에서의 해석도 수행하였다.

**Fig. 3** Meshing condition of boom

4.2 하중 조건

장기/중기에서의 하중은 JIS(Japanese Industrial Standard) 규격에 따라 붐 자중에 의한 하중과 주행, 러핑, 회전 가속에 의한 하중을 계산하여 입력하였다. 하중 조건으로 사용되는 관성력은 식 (1)을 통해 계산되었고, 조건별 세부 하중입력 값은 Table 2와 같이 부여하였다. 참고적으로 JIS B 8831을 근거로 β_{TL} 는 주행속도가 30 m/min 기준에서, β_{SL} 는 선회 속도가 0.2 rpm을 기준으로 하여 값을 산출하였다.

$$F_i = W_i \cdot g \cdot \beta \quad (1)$$

태풍시인 단기 조건에서의 하중은 붐이 레스트(rest)에 위치하는데, 이때는 풍하중만 존재하기 때문에 앞서 언급한 계수들은 고려하지 않았다.

4.2.1 붐 자중/주행 하중

3D 모델링을 할 때 밀도 계산에 관련되는 계수값(K , ψ , β_{TL})과 가속도를 부여함으로써 자중에 의한 하중과 주행하중을 구현하였다. 단, 단기 조건에서는 계수값을 고려할 필요가 없기 때문에 기본적인 수직방향의 중력가속도만 고려하여 하중을 부여하였다.

4.2.2 회전 하중

붐은 선회할 때 0.2 rpm의 속도를 가지는데, 이때 붐이 받는 하중은 β_{SL} 와 관련된다. 또한 β_{SL} 는 식 (2)와 같이 속도의 함수인데, 이 속도는 붐 마운트부터 위치에 따라서 변하게 된다. 따라서, 본 연구에서는 붐의 각 부분별 속도를 구하고, 이를 통해 구한 β_{SL} 값과 해당 부분의 질량과의 관계식을 통해 하중값을 구해서 붐에 입력하였다.

$$\beta_{SL} = 0.046 \sqrt{V_m} \quad (2)$$

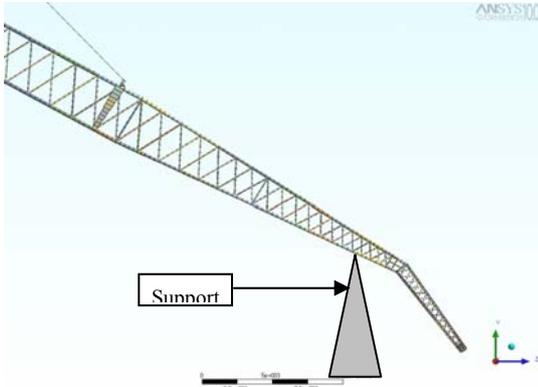


Fig. 4 Additional fix point in rest condition

4.2.3 풍하중

다양한 크기(직경)와 형태의 파이프로 이루어진 붐에서의 풍하중(F)은 식 (3)에 의해서 계산되는데, 이 식에서의 풍력계수(C)는 파이프의 직경(d)과 속도압(q)의 관계식 (4)와 (5)에 의해서 구해진다.

$$F = CqA \tag{3}$$

$$d\sqrt{q} < 3.0 \rightarrow C=1.2 \tag{4}$$

$$3.0 \leq d\sqrt{q} \rightarrow C=0.7 \tag{5}$$

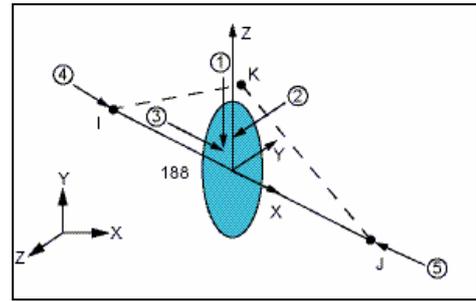
5. 해석진행 및 결과

5.1 붐 모델링

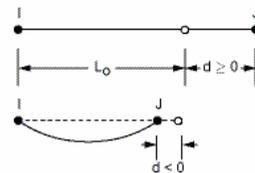
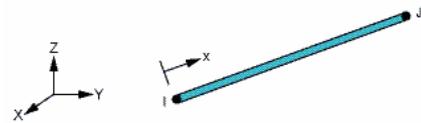
붐은 Table 1에 명시된 바와 같이 작업반경 또는 후크 하중(70, 60, 35, 25톤, no load)에 따라서 수평으로 가정한 지면과 이루는 각이 각각 71.18°, 60.96°, 33.02°, 26.78° 및 -30°가 되지만, 캐드 프로그램상에서 각도를 설정할 때 소수점 이하에 대한 기능이 제한된 관계로 이를 71°, 61°, 33°, 27° 및 -30°로 각을 수정하고 모델링을 완성하였다.

5.2 붐 요소분할

붐에 대한 모델링 작업 이후 주요 구성품별로 별도의 크기로 요소분할(meshing)을 수행하였다. 러프 로프(luff rope)는 로프 특성상 변위가 붐에 비해 무시할 수 있을 정도이므로 변위가 미소량이라는 가정하에 단일 요소로 하였고, 나머지 부분은 붐의 최소 길이인 420 mm를 기준으로 요소 크기를 설정하고 분할을 하였다. 그 결과 붐 구조물은 Fig. 3에서와 같이 절점(node)은 약 4,200여 개, 요소는 4,600 여 개로 분할되었다.



(a) Beam 188 element
(Beam element of ANSYS WorkBench)



Tension-Only (Cable) Option

(b) Link 10 element

(Cable element in the ANSYS Classic)

Fig. 5 Comparison of two Luff rope element type

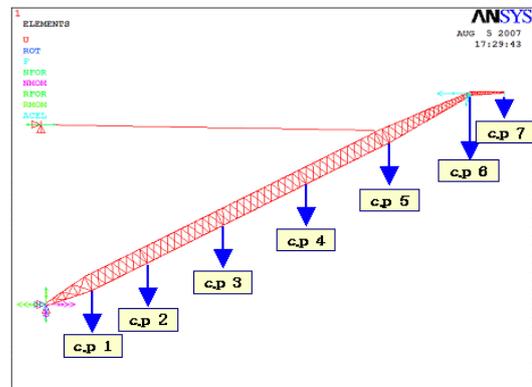


Fig. 6 Position of check point for deformation in boom

5.3 붐 경계조건

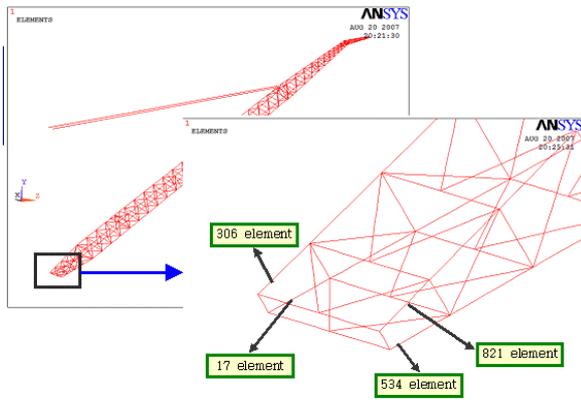
붐 구조물 해석을 수행함에 있어서 먼저 고정되는 부위에 대한 경계조건 부여가 필요하다. 장기, 중기 조건에서의 고정점은 Fig. 2에 표현된 A-구조물과 연결되는 러프 로프의 좌우 2 곳과, 붐 마운트의 좌우 2 곳 등 총 4 곳인데, 도르레 형식의 탑 블록 쉬버(sheave)와 연결된 러프 로프는 X, Y, Z축 변위(DX, DY, DZ)를 모두 구속하였고, 힌지와 핀을 통해 연결된 붐 마운트는 X축 모멘트를 제외한 나머지 변위(DX, DY, DZ)와 모멘트(MY, MZ)를 구속하였다. 또한,

Table 3 Tension results of the luff rope

Case			Luff rope tension (kgf)
Long term	90-42M×70TON-NW	L/H Luff rope	40566
		R/H Luff rope	0.000
	90-60M×60TON-NW	L/H Luff rope	63698
		R/H Luff rope	0.000
	90-99M×35TON-NW	L/H Luff rope	21275
		R/H Luff rope	100887
	90-105M×25TON-NW	L/H Luff rope	33910
		R/H Luff rope	95965
Mid. term	90-42M×70TON-W	L/H Luff rope	43418
		R/H Luff rope	0.000
	90-60M×60TON-W	L/H Luff rope	63698
		R/H Luff rope	0.000
	90-99M×35TON-W	L/H Luff rope	0.000
		R/H Luff rope	122959
	90-105M×25TON-W	L/H Luff rope	18614
		R/H Luff rope	111265
Short term	0-rest×no Load-0° Wind	L/H Luff rope	79045
		R/H Luff rope	90418
	0-rest×no Load-90° Wind	L/H Luff rope	99324
		R/H Luff rope	74319

Table 4 Axial force results of major elements

Case		Element No.	Axial force(kgf)
Long term	90-42M×70TON-NW	307	-27916
		17	-11800
		821	-191837
		534	-172949
Mid. term	90-42M×70TON-W	307	11749
		17	26753
		821	-231806
		534	-214133
	90-60M×60TON-W	307	15787
		17	35242
		821	-225153
		534	-197561
90-99M×35TON-W	307	13971	
	17	37492	
	821	-191827	
	534	-143582	
90-105M×25TON-W	307	12431	
	17	41512	
	821	-169582	
	534	-121908	
Short term	0-rest×no Load-90° Wind	307	-709
		17	35905
		821	-102214
		534	-64079

**Fig. 7** Position of major elements for boom axial force

단기 조건에서는 Fig. 4에서와 같이 지면의 지지대에 올려지는 부분에 대한 변위 구속을 추가하였다.

5.4 ANSYS Classic 전환

ANSYS Workbench에서는 기본적으로 해석 요소가 한정되어 있기 때문에 러프 로프와 같이 압축하중을 받게 될 경우 반발력이 발생하지 않고 인장하중을 받을 경우에만 인장력만 전달하는 비선형 케이블 요소를 구현할 수가 없다. 그래서, ANSYS Workbench에서의 빔 기본요소인 Beam 188를 ANSYS Classic에서 Link 10로 전환하여

인장력만을 전달하는 케이블을 묘사하였다(Fig. 5). 이를 통해 좀 더 실제와 유사한 붐 거동을 구현할 수 있었다.⁽⁹⁾

5.5 붐의 해석결과

5.5.1 붐의 변형

ANSYS Classic 해석을 통해 Fig. 6에 표시된 체크 포인트(check point, 이하 c.p.)에서의 X, Y, Z축의 변위값을 구하였다. X축 방향 최대변위는 90-42M×70TON-W 조건의 c.p.7에서 -761.68 mm이었다. Y축 방향의 변위는 27°, 33°, -30° 조건에서도 대체적으로 높게 나왔지만 0-rest×no load-Wind 0° 에서 -179.20 mm로 가장 높게 나타났다. Z축 방향의 최대변위는 90-42M×70TON-W 조건의 c.p.7에서 762.11 mm인 것으로 나왔다.

5.5.2 붐의 러프 로프 장력

붐의 좌우 러프 로프에 대한 장력을 구한 결과, Table 3에서와 같이 90-42M×70TON-NW의 우측 러프 로프를 비롯한 5개의 경우에서 장력이 “zero”로 나왔는데, 이는 인장력만을 전달하는

Table 5 Definition of axial stress and bending stress

	Definition	Remark
Axial stress	FX / A	. FX : axial load . A : area of cross section
Bending stress on +Y side of beam	$MZ * Y_{max} / I_{zz}$. MZ, MY : bending moment . $Y_{max, min}$: max, min of Y coordinates in the cross section measured from the centroid . I_{zz}, I_{yy} : moments of inertia of the cross section
Bending stress on -Y side of beam	$MZ * Y_{min} / I_{zz}$	
Bending stress on +Z side of beam	$MY * Z_{max} / I_{yy}$	
Bending stress on -Z side of beam	$MY * Z_{min} / I_{yy}$	

Table 6 Allowable stress of STKM20A

Long term		Mid. term		Short term	
tension	compression	tension	compression	tension	compression
260MPa	226 MPa	299MPa	260MPa	338MPa	293MPa

케이블 요소인 러프 로프가 압축 하중을 받았기 때문에 판단된다. 90-99M×35TON-W의 우측 러프 로프에서 122,959 kgf로 최대 인장력값을 갖는 것으로 나타났다.

5.5.3 붐의 축력

Fig. 7에서와 같이 요소분할을 통해 생성된 붐 하단부의 4개 요소(17, 306, 534, 821)에 대해서 축력값을 구하였다. 그 결과, 붐 좌측인 17, 306번 요소는 각도, 풍압 등의 조건별로 압축 또는 인장을 받는 것으로 나타났으나, 붐 우측인 534, 821번 요소는 모든 조건에서 압축(-)을 받는 것으로 나타났으며, 최대값은 90-42M×70TON-W에서 -231,806 kgf인 것으로 나왔다. Table 4에 정리된 것과 같이 구해진 축력값들은 주행, 선회, 풍하중의 입력 방향과 비교해서 타당한 결과이다.

5.5.4 붐의 축응력과 굽힘응력

Table 5에 정리된 정의에 의해서 붐 전체 요소에 대한 축응력과 굽힘응력을 구한 결과, 최대 축응력값은 중기 조건인 90-42M×70TON-W의 붐 마운트 부위에서 158 MPa로 나타났으며, 최대 굽힘응력은 단기 조건인 0-rest×no Load-0W에서는 주 후크가 걸리는 파이프에서 약 90 MPa이 발생하였다. 이는 Table 6에 정리된 기계구조용 탄소강강관(STKM20A)의 허용응력을 초과하지 않아 축응력과 굽힘응력에서는 구조적으로 안전함을 확인하였다.

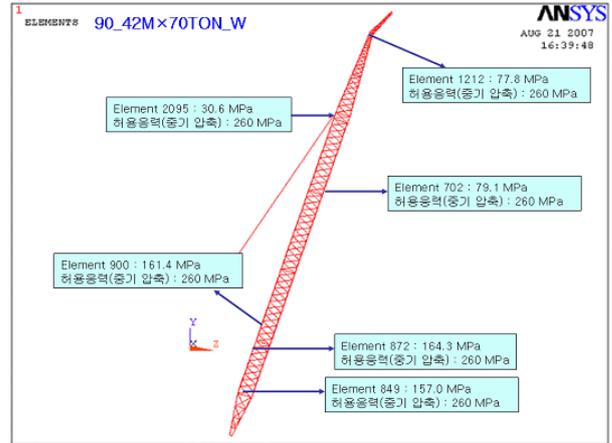


Fig. 8 von-Mises stress result of boom in 90-42M×70TON-W

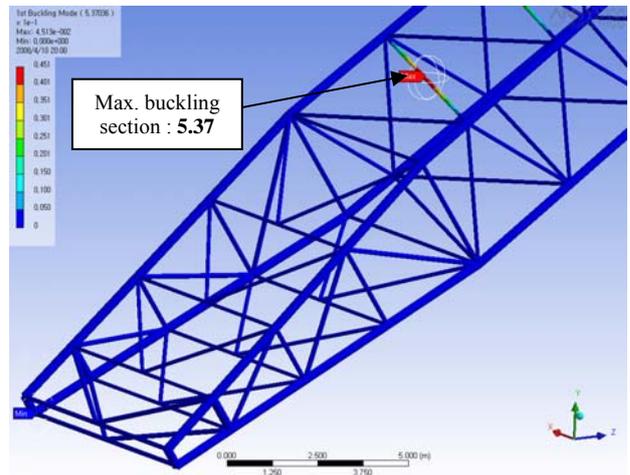


Fig. 9 Buckling result of boom in 90-99M×35TON-W

5.5.5 붐의 등가응력

연성재료 파단을 평가하는 등가응력(von-Mises stress)으로 붐의 파손여부를 평가하였다. 장기, 중기, 단기 조건별 응력이 집중되는 주요 요소에서 등가응력을 확인한 결과 최대 등가 응력은 중기 조건인 90-42M×70TON-W에서 나타났다. 중기 조건인 90-42M×70TON-W에서의 등가 응력은 Fig. 8과 같으며, 요소분할 이후 주요 부위에 대한 응력값 확인결과 872번 요소에서 164.3MPa의 최대 등가응력을 갖는 것으로 나타났다. 이 등가 응력값 역시 Table 6의 허용응력값을 초과하지 않으므로 붐은 구조설계상 안전성을 갖는 것으로 판단된다.

5.5.6 붐의 좌굴

좌굴은 탄성 불안정현상의 일종으로 붐과 같이 단면적에 비해 길이가 상대적으로 긴 구조물에서

Table 7 Natural frequency and natural mode of boom
unit : Hz

	1st	2nd	3rd	4th	5th	6th
	1 st X-bending mode	1 st Y-torsion mode	2 nd X-bending mode	1 st Z-bending mode	2 nd Y-torsion mode	3 rd X-bending mode
71°	0.52	0.69	0.83	1.20	1.89	1.97
61°	0.52	0.88	0.96	1.26	1.94	2.00
33°	0.51	0.94	0.96	1.29	1.44	1.46
27°	0.51	0.95	0.97	1.28	1.32	1.35
-30°	0.51	0.96	0.98	1.29	1.41	1.43

쉽게 발생하며, 좌굴에 의한 구조물 파손은 크레인의 건전성 평가에 중요한 항목이다. 따라서 모든 조건에서 붐의 좌굴을 평가하였다.

Fig. 9는 중기 조건인 90-99M×35TON-W에서의 좌굴 결과로, 1차 좌굴 모드가 발생하기 위해서는 부여된 하중의 5.37배가 작용될 경우에만 미소의 좌굴이 발생되는 것을 보여주고 있다. 다른 조건들도 거의 유사한 결과값을 보여주고 있기 때문에 붐의 좌굴 안전성은 우수한 것으로 평가할 수 있었다.

5.5.7 붐의 고유 진동수

바람, 지진, 크레인 모터의 작동 등 외부 가진이 고유진동수와 일치할 경우 공진현상이 발생되어 구조물의 변형을 크게 만들어 결국에는 파손을 야기시킬 수 있다. 따라서 고유진동수와 고유모드는 붐의 건전성을 판단하는 하나의 기준이 될 수 있다. 붐의 각도가 71°, 61°, 33°, 27°, -30°인 각각의 경우에 대하여 계산하였으며, 각 조건에 대한 저주파 6개 고유진동수를 계산하였고, 그 결과를 Table 7에 정리하였다. 이들 주파수는 크레인 모터의 가진영역과는 상관이 없으나, 특히 1차 X-굽힘모드(방향), 1차 Y-비틀림 모드, 1차 Z-굽힘모드의 주파수는 각각 0.51~0.52 Hz, 0.69~0.96, 1.20~1.29 Hz이므로 해당 방향으로 동일 주파수의 풍가진이 있을 경우에는 구조물에 영향을 미칠 수 있음을 확인하였다.

6. 결론

대형 선박 건조를 위해서 설계, 제작된 정격하중

70톤, 작업반경 105m인 대형 특수 크레인인 70/15Ton×150M LLC의 붐에 대한 설계 안전성을 검증하기 위하여 유한요소법을 통한 평가를 수행하였다. 빔 요소로 모델링된 붐에 대해서 JIS 규격을 적용하여 하중 조건을 부여하였으며, 장기, 중기, 단기 등의 모든 조건에서 하중은 계속 중첩하여 가장 악조건을 가하는 방향으로 값들을 입력하였다. 붐의 각도, 풍하중 방향 등에 따른 총 12개 조건에 대해서 해석을 수행하였고, 축응력, 굽힘응력 및 등가응력에서 계산된 값들이 모두 재료의 허용응력 이내의 값을 가지는 것으로 나타났다. 또한, 좌굴에 대한 안전성을 검토한 결과에서도 문제점이 없는 것으로 확인하였다.

참고문헌

- (1) Howard I. Shapiro, P.E, Jay P. Shapiro, P.E, Lawrence K. Shapiro, P.E, 1999, *Cranes and Derricks*, McGraw-Hill, pp. 89-102.
- (2) J. S. Lee, K. H. Cho, 1998, *Heavy Equipment Engineering*, Daekwang, pp 35-42.
- (3) JIS B 8821, 2004, *Calculation standards for steel structures of cranes*, Japanese Standards Association, pp. 2-14.
- (4) JIS B 8830, 2001, *Cranes-Wind load assessment*, Japanese Standards Association, pp. 2-3.
- (5) JIS B 8831, 2001, *Cranes-Design principles for loads and load combinations*, Japanese Standards Association, pp. 3-9.
- (6) Kyung-min Gu, Do-kwan Hong, Suk-chang Choi, Geun-Jo Han, Chan-woo Ahn, 2002, "A Study on the Reduction of Over Head Crane's Weight Considering Buckling, Vibration and Strength," *Spring Conferences of KSME*, pp 1084-1089.
- (7) Klaus-Jürgen Bathe, 1996, *Finite Element Procedures*, Prentice-Hall International, Inc., pp. 2-4.
- (8) Sang Yeol Kim, Hyung Sub Bae, Yuk Hyung Lee, Myeong Kwan Park, 2007, "Computer Simulation for Residual Life Expectancy of a Container Crane Boom Structure," *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, Vol.22, No.9, pp 119-129.
- (9) ANSYS Release 11.0, 2007, *Elements Reference*, ANSYS, Inc., pp. 96-138.