

복합 굴절차의 붐과 바스켓에 대한 구조 해석

소수현*, 강성수⁺

(Manuscript received: Aug, 29, 2012 / Revised: Sep, 20, 2012 / Accepted: Sep, 27, 2012)

Structural Analysis of Booms and Basket in the Multi-aerial Platform

Soo-Hyun So*, Sung-Soo Kang⁺

Abstract

In this study, some structural analysis using 3D CAD data, material properties, load conditions and boundary conditions are carried out to evaluate structural stability of the multi-aerial platform for high-rise fire fighting and rescue. We conduct structural analysis for the upper structures such as turn table, booms and basket, by using a universal structural analysis program NASTRAN. As the results, there is local stress exceeding the yield strength, but it is able to relax stress concentration in a way such as changing thickness of the structure or making larger inertia moment in cross section of booms.

Key Words : Multi-aerial platform(복합 굴절차), Structural stability(구조 안정성), Finite element analysis(유한요소해석), Boom system (붐 시스템)

1. 서론

최근 급격한 경제 성장과 더불어 신도시 아파트, 주상복합 및 업무용 건축물 등 초고층 빌딩이 많이 건설되고 있고, 국제화에 맞춘 각 지방 자치 단체의 빈번한 국제 행사 개최에 따른 대형 행사장 및 고층 건물에 대한 수요가 꾸준히 증가하고 있다. 하지만 고층 빌딩용 구조 장비에 대해서는 현재 높이 52m 급 까지만 보급되어 있어 20층 이상의 초고층 빌딩에서 발생하는 화재 또는 구조 활동 등 긴급 상황에 대한 적절한 대비책을 강구하기 어려워 사각 지대가 발생하고 있다^(1,2).

이러한 고층용 소방차량 관련 개발 동향을 정리하면 다음과 같다⁽³⁾. 먼저 중국의 경우 신도시를 기반으로 경제 성장이 이루어지고 있는 가운데, 국제화에 맞추어 100m 급 장비 도입이 이루어져 초고층 건물에 대한 보호를 하고 있으나 모두 수입품으로 대체하고 있고, 유럽의 경우 유럽 내 생산 제품으로 초고층 건

축물에 대해 보호하고 있고 각종 규정 등을 이유로 외국산 장비의 도입이 어려우며, 유럽 내 제품에 대해서는 활발히 유통되고 있다. 동남아 국가들에 대해서도 초고층 건물에 대한 보호책으로 유럽산 제품을 수입하여 보급하고 있는 실정이며, 국내의 일부 소방차 제작사들은 초고층 장비를 개발하여 내수 및 수출을 하고자 하지만 개발 비용 및 개발된 신제품에 대한 수요 등에 대한 확신이 서지 않아 개발과 투자에 대해 주저하고 있는 실정이며, 외국산 장비를 수입하려 하더라도 많은 제품들이 국내 기준(차량 길이 13m)에 부적합한 현실이다⁽³⁾.

본 연구에서는 소방용 복합 굴절 사다리차의 강도 해석을 통한 구조적 안정성을 평가하기 위해, 68m 급 복합 굴절차 설계를 위한 3차원 CAD 데이터 및 사용 재질에 대한 물성 자료, 하중과 경계 조건을 바탕으로 굴절차에 대한 구조 안정도 해석을 실시하였다^(4,5). 구조적 안정성을 평가하기 위해 범용 구조 해석 프로그램인 Nastran을 활용하였으며⁽⁶⁻¹⁰⁾, 상부 구조물인

* 경일대학교 소방방재학과

+ 교신저자, 전주대학교 기계자동차공학과

주소: 560-759 전북 전주시 완산구 효자동3가 1200

✉ Corresponding Author E-mail: sskang@jj.ac.kr

Turn table, 붐, 바스켓에 대한 해석을 수행하였다.

2. 설계 사양

국내 소방용 차량 안전기준에 맞춘 제원 개발을 목표로, Fig. 1과 같이 국내 도로 교통법 상 전장 13m, 전고 4m, 전폭 2.5m, 차량 총 중량 39 ton인 완성 차량 기준 필수 제원을 규격으로 하였다. 특히 차량의 총 중량이 무거울수록 주행 가능한 교량의 폭이 줄어들어 신속 출동을 요하는 소방차의 경우 큰 장애 요인이 될 수 있다. 최고 작업 높이 목표를 68m로 설정하였으며⁽³⁾, 작업 높이는 기립각 80도 및 굴절각 170도 이상인 상태에서 지면에서부터 바스켓 난간까지의 높이이다. 상세한 설계 사양과 관련항 유럽의 규정(EN1777:2010)에 준하여 실시하였으며

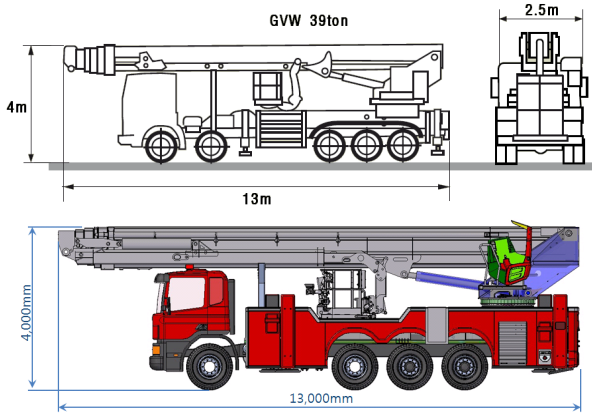


Fig. 1 Schematic view of multi-aerial platform

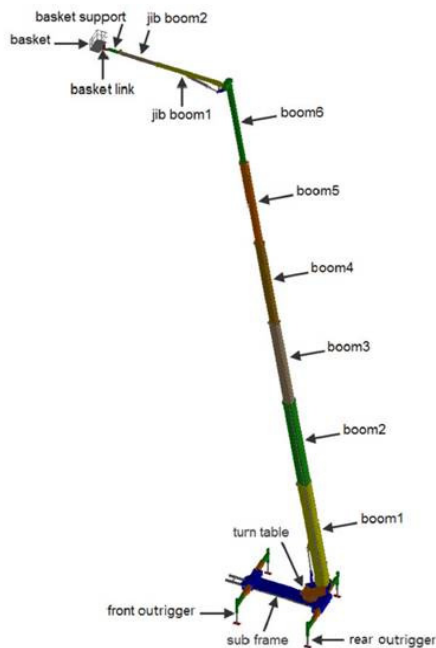


Fig. 2 Configuration of multi-aerial platform

⁽¹¹⁾, 붐(boom) 장치와 관련하여, 붐의 형식은 텔레스코픽 직진식 붐과 텔레스코픽 JIB 붐이 조합된 복합식으로, 바스켓 지지대(support)는 기립식으로 용량 270kg 이상으로 정하였고, 직진 붐 6단 및 JIB 붐 2단으로 설정하였다.

Fig. 2와 같이 복합 굴절 사다리차는 모두 6단으로 구성된 붐과 2단으로 구성된 굴절식 붐, 이를 차량에 장착하고 작동을 위한 Turn table, 상부와 하부 구조물 및 실린더 등으로 구성되어 있다. Fig. 2는 붐 전체가 신장된 상태를 나타내고 있으며, 현 위치에서의 작업 반경은 20,249mm이고, 기립 높이는 59,521mm이다.

3. 구조 해석

3.1 해석 모델

Fig. 3과 같이 복합 굴절차의 붐 기울기에 따른 기립 각도가 0도(Case 1), 62.9도(Case 2) 및 80.97도(Case 3)의 3가지 경우에 대하여 구조해석을 실시하였다⁽⁹⁾. 전도에 대한 안정도 해석은 EN1777:2010 5.2.4에 의해 제시된 기준을 대상으로 하여 각각의 하중 조건을 3가지 작업 위치에 대해 적용하였다⁽¹¹⁾. 즉 Case 1은 수평 작업 상태를 나타내고 있으며, Case 2는 붐 4~6단이 최대 신장된 상태이고, Case 3은 붐 1~6단이 최대 신장된 모습을 보여주고 있다.

본 해석에 적용된 각 파트별 재료 물성치는 Table 1과 같으며, Table 2와 같이 디자인 중량과 유한요소 모델에서 계산한 중량 사이에는 많은 차이가 나는 것을 볼 수 있다. 이것은, 유한요소 모델의 경우 강도 부재 및 실린더만을 모델에 반영하였으나, 실 제품은 그 외에도, 유압 장치, 전기 장치 등과 같이 부수적으로 장착되는 부품들이 많기 때문이다. 이 차이를 개선하기 위하여, 각 시스템별 차이가 나는 중량은 여러 개의 집중 질량으로 나누어서, 각 시스템에 반영하여, 최종적인 각 시스템별 중량은 실시설계 단계에서 얻은 데이터와 일치하도록 조정하여 해석을 수행하였다.

3.2 경계 조건

Fig. 4와 같이 링 기어가 하부 구조물에 체결되는 볼트들을 6개 방향 모두 고정하였으며, 안쪽 링과 바깥쪽 링을 하나의 일체로 모델링하여 해석을 수행하였다.

3.3 하중 조건

복합 굴절차의 구조적 안정성을 분석하기 위해 BS EN1777:2010을 기본으로 요구되는 디자인 및 구조안정성 평가를 적용하였다⁽¹¹⁾. 해당 규정을 근거로 구조해석에서 고려되어야 되는 하중에는 정적 하중과 구조물 하중, 풍하중 및 추가 하중을 적용하였고 붐의 각도 및 위치에 따른 최악의 조건을 도출하여

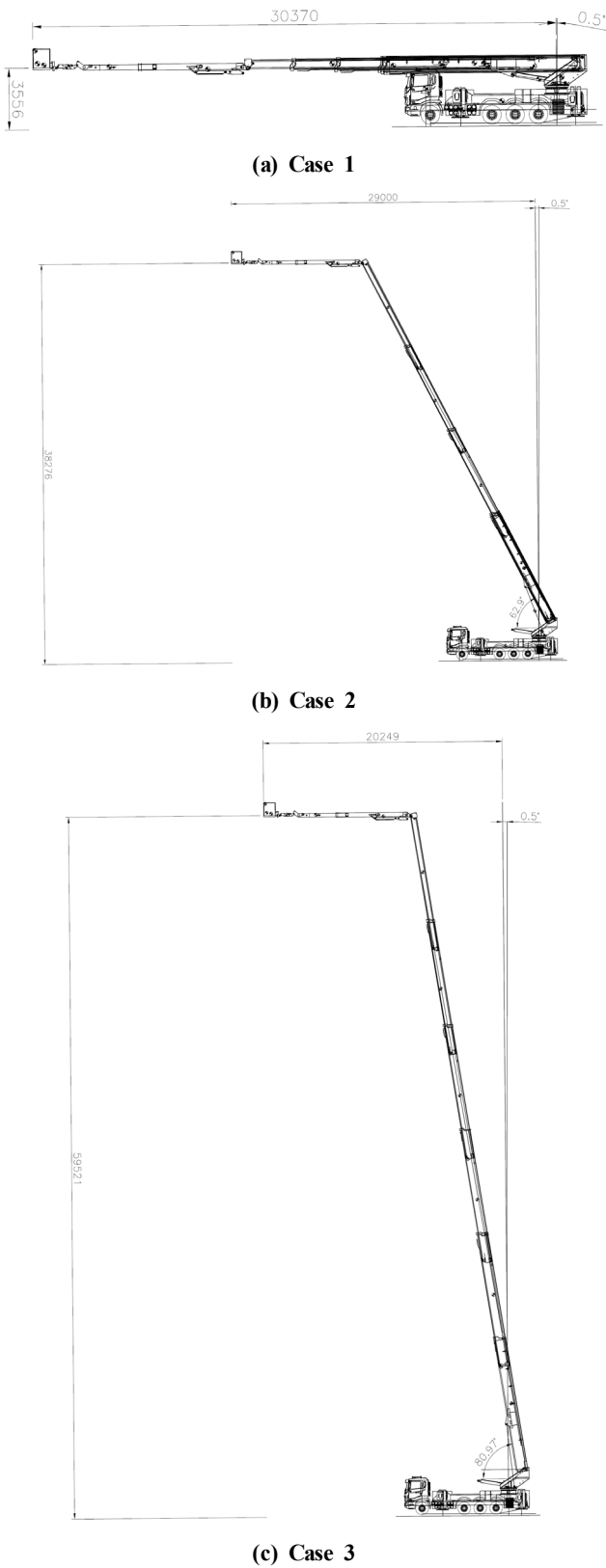


Fig. 3 Models for each case

전도 조건을 고려하여, 실제 사용에 있어서 하중 시험 조건과 안전 사항을 검토하였고 이를 토대로 구조해석을 수행하여 안

Table 1 Material constants

Material	Yield strength [MPa]	Elastic strength [GPa]	Poisson's ratio	Density [kg/m ³]
ATOS80	700	207	0.29	7850
STE690	677	205.9	0.29	7850
STE890	883	205.9	0.29	7850
SM490A	325	207	0.29	7850
SCM415	686	205.9	0.29	7850
SCM440	834	205.9	0.29	7850
ST52	370	207	0.29	7860
MC901	89	2.5	0.29	1140

Table 2 Weight for each part

Part	CAD data [kg]	FE data [kg]	Weight difference [kg]
Turn table	2,374	1,762	612
1st boom	3,068	2,704	364
2nd boom	2,559	2,390	169
3rd boom	2,127	1,927	200
4th boom	2,171	1,920	251
5th boom	1,321	1,087	234
6th boom	999	953	46
1st JIB boom	750	718	32
2nd JIB boom	282	254	28
Basket support	101	112	-11
Basket	432	189	243
Side cylinder	1,115	1,116	-1
Total	17,299	15,132	2,168

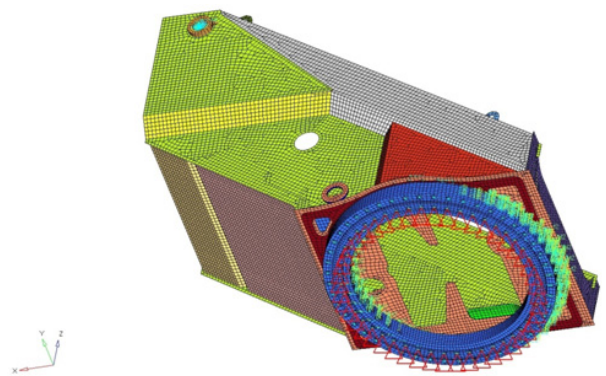


Fig. 4 Boundary condition for turn table

정성을 검토하였다. 그 결과, Fig. 5와 같이 하중 조건은 3가지 Case에 대하여 정격 하중과 부가 하중 및 풍하중을 각각 입력하여 해석을 수행하였다.

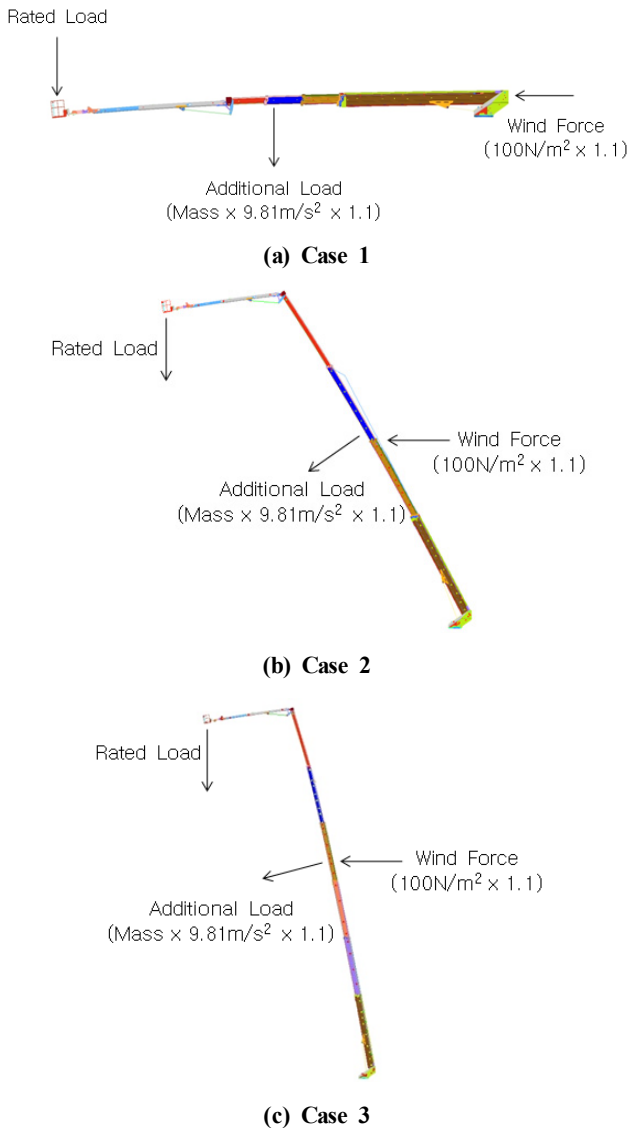


Fig. 5 Load condition for each case

3.4 안정성 요소

복합 굴절차의 구조적 안전성에 대한 분석 결과를 정리하면 다음과 같다. 먼저 붐 동작 시 발생하는 관성에 의한 동적 안전성 요소는 EN1777:2010 5.24 및 5.4.1.2 요구 조건과 같이⁽¹¹⁾, 각 구조물에 대하여 10% 하중이 동작 방향의 지지점을 중심으로 하여 전도 및 하중 증가 요인이 발생하는 것으로 하여 계산되어지며 테스트를 통하여 검증되는 경우 10%보다 낮은 값을 허용하고 있다. 또한 기후적 요인에 따른 안전성 요소는 EN1777:2010 5.2.3.4.에서 요구되는 12.5m/s 조건으로 요구되는 계산 방식에 의하여 풍하중을 고려하였다. 위치에 다른 안정성 요소는 지반의 미세 침하 등을 고려하여 0.5도 약조건 경사 상태에서 작업이 이루어지는 것을 가정하여 전복 계산을 실시하였다.

이상의 요소에 대한 EN1777:2010 5.24 및 5.4.1.2 요구 조

Table 3 Calculation of loads and moments for each case

Items	Weight (kg.mm)	Dynamic load (kg.mm)	Wind load (kg.mm)	Total moment (kg.mm)
Case 1	124,998,220	12,455,596	154,287	137,608,103
Case 2	99,031,472	23,703,548	7,059,213	129,794,233
Case 3	62,427,318	41,494,446	17,262,297	121,184,061

Table 4 Maximum stress for each part

Part	Maximum stress [MPa]			Position
	Case 1	Case 2	Case 3	
Turn table	967.2	809.5	593.1	Front-left side ring gear contact point
1st boom	593.2	415.2	967.8	Side cylinder support
2nd boom	243.3	592.8	1090	Lower 1st boom support
3rd boom	387.3	1052	606.4	Upper 4th boom support
4th boom	384.1	1052	512.8	Lower 3rd boom support
5th boom	523	2634	1146	Lower edge
6th boom	1210	1209	1207	Upper edge of □ inner box
1st JIB boom	469	444.1	623.6	less than strength
2nd JIB boom	439.3	399.4	598.3	less than strength
Basket support	393.7	415.1	415.3	less than strength
Basket	112.9	113.0	113.3	less than strength

건에 부합하도록 하중을 적용하여⁽¹¹⁾, Table 3과 같이 풍하중과 동하중이 장비 전체에 미치는 모멘트의 영향을 산출하였다.

4. 해석 결과

4.1 응력

앞서 기술한 물성치와 경계 조건, 하중 조건 및 안정성 요소를 기반으로 구조 해석을 수행하였으며, 각 파트별 최대 응력과 발생 위치에 대한 결과를 Table 4에 정리하였다. 붐에 사용된 강재는 대부분이 ATOS80으로 되어있으며, 일부 폴리, 핀 및 와이어를 고정하는 브라켓 등이 기타 소재로 되어 있다. 따라서 해석 결과들은 ATOS80의 항복 강도인 700MPa을 기준으로 비교하였다. 해석은 Case 1~3에 대하여 전체 응력 분포도 및 최대 응력 발생 위치를 Fig. 6~8에 나타내었다.

먼저 Table 4와 Fig. 6과 같이, Case 1의 경우 Turn table과 6번 붐에서 강재의 허용치를 넘는 응력이 나타났다. Turn table에서의 최대 응력은 STE690 재질의 Base plate에서 발생하였

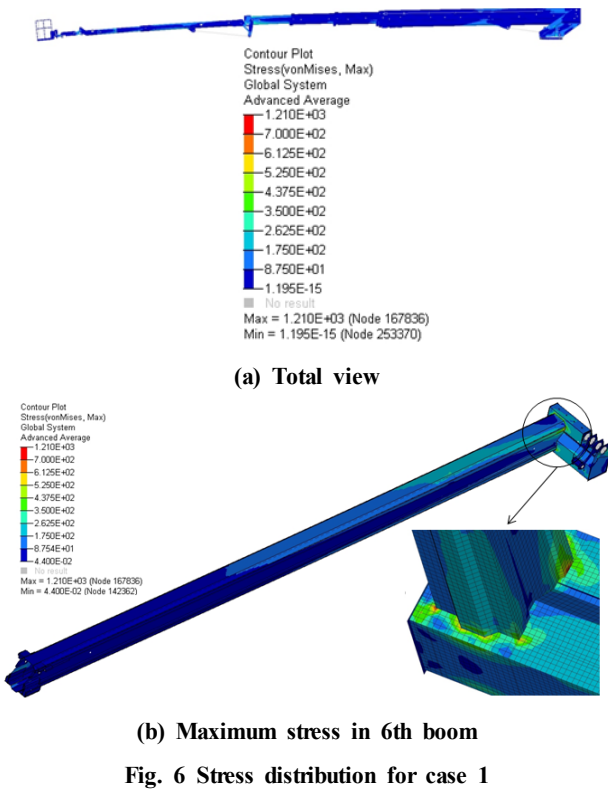


Fig. 6 Stress distribution for case 1

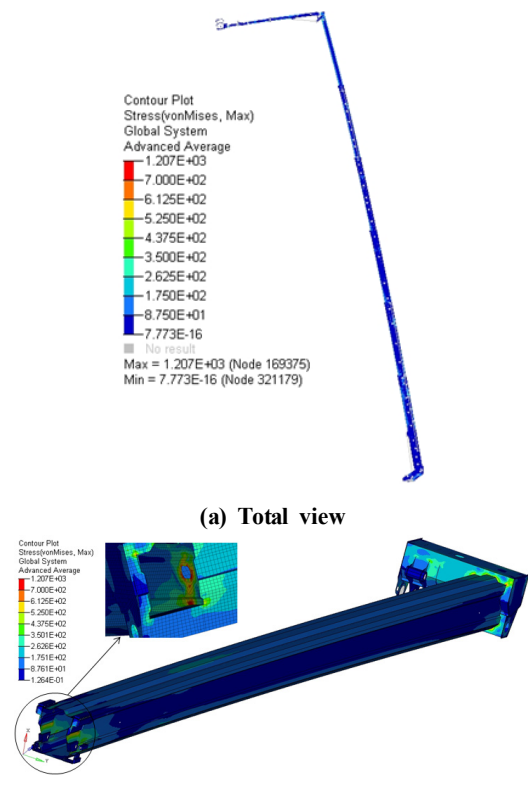


Fig. 8 Stress distribution for case 3

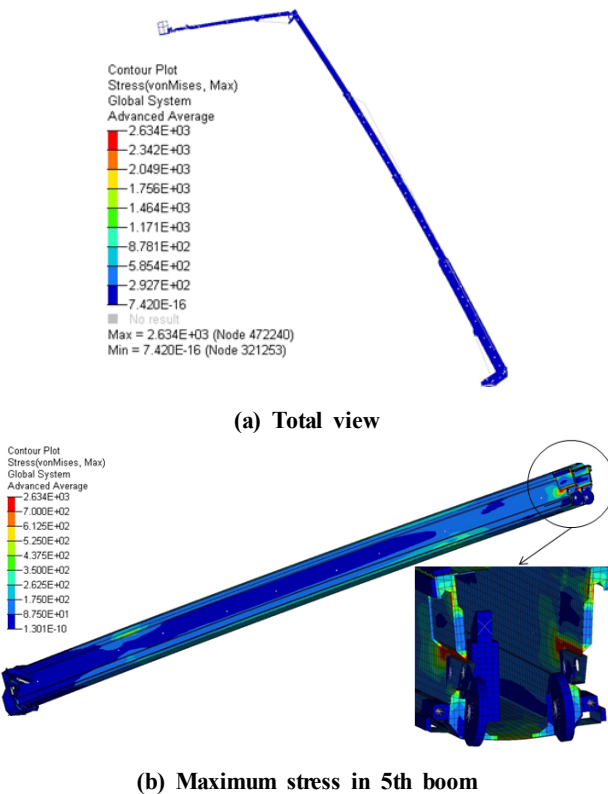


Fig. 7 Stress distribution for case 2

링크로 연결된 JIB 붐이 굴절식으로 되어 있어, 무게 중심이 6번 붐과 동일 선상에 있지 않아 오프셋을 유발한다. 이러한 오프셋에 의해, □박스 내측의 판재가 뒤틀리는 현상으로 인하여 응력이 크게 발생하였다.

Case 2의 경우 Turn table과 3, 4, 5, 6번 붐에서 강재의 허용치를 넘는 응력이 나타났다. Turn table 및 6번 붐에 대하여, 응력이 항복강도를 넘는 것에 대한 기술은 Case 1과 같다. Case 1의 4, 5, 6번 붐들이 절반 정도만 신장된 상태인데 비해, Case 2에서는 모두 신장된 상태로 각 단별 지지 영역에서 응력이 크게 발생하였다. 3, 4번 붐에서의 과도한 응력은 국부적인 보강으로 개선이 가능하다. 또한 5번 붐에서의 과도한 응력 발생은 국부적으로 단면이 작은 부위로 인한 것으로, 단면 확대가 필요하다.

또한 Case 3의 경우 1, 2, 5, 6번 붐에서 강재의 허용치를 넘는 응력이 나타났다. 1, 2번 붐의 사이드 실린더 지지부에서 발생하는 응력은 실린더 인장에 따른 모멘트에 의한 것이다. 5, 6번 붐에서의 과도한 응력은 국부적으로 단면이 작은 부위가 존재하여 나타나는 현상으로, 이에 대한 보강이 필요하다.

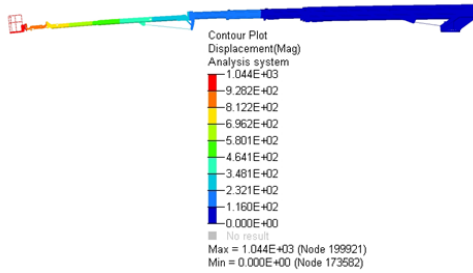
4.2 변형

변형에 대한 해석 결과를 Table 5와 Fig. 9에 나타내었다. 일반적으로, 중력에 의한 처짐은 붐이 수평 상태일 때 가장 크

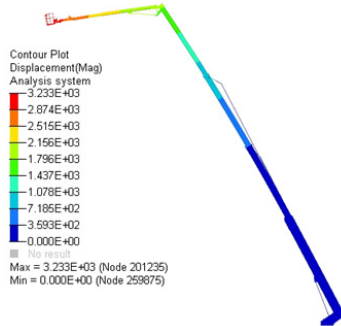
으며, 하단의 링 기어 부위를 확대하여 보강재의 역할을 확대할 필요가 있다. 또한 6번 붐에서의 과도한 응력 발생은 6번 붐과

Table 5 Maximum deflection for each part

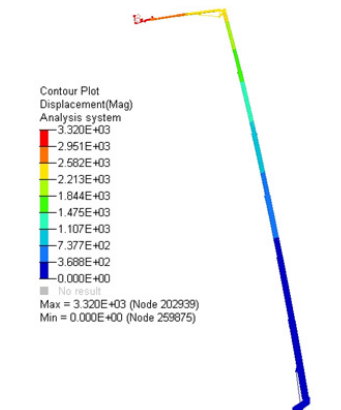
Items	Length of boom [mm]	Maximum deflection [mm]
Case 1	30,370	1,032
Case 2	44,968	3,018
Case 3	61,723	3,472



(a) Case 1



(b) Case 2



(c) Case 3

Fig. 9 Deformation

게 나타난다. 하지만, Table 5와 Fig. 9를 참조하면, 수평 상태인 Case 1에 비해, Case 2와 Case 3이 더 큰 처짐을 보임을 알 수 있다. 이는 Case 1에서는 수평 작업을 가정하여, JIB 붐은 최대한 신장하였으나 4~6단은 절반 정도만 신장하였고, 1~3단은 신장하지 않았으므로 고정점인 Turn table에서부터의 모멘트 암이 가장 짧았기 때문이다. 이로 인해 신장된 붐의 길이가 가장 짧아지게 되었다. 또한 Case 2와 Case 3를 비교하

면, 신장된 붐의 길이가 짧은 Case 2의 처짐과 신장된 붐의 길이가 긴 Case 3의 처짐이 유사함을 알 수 있으며, 이는 전술한 바와 같이, 모멘트 암에 기인한다.

본 해석 결과를 통상적인 사다리 형태의 처짐과 비교하면, 처짐이 적음을 알 수 있다. 이는 본 해석 모델은 박스 형태를 가지고 있어서 T자 형태인 통상적인 사다리 형태의 붐보다 높은 강성을 가지고 있기 때문이다.

5. 결론

본 연구에서는 소방용 복합 굴절 사다리차의 강도 해석을 통한 구조적 안정성을 평가하기 위해, 굴절차에 대한 구조 안정도 해석을 실시한 결과, 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

- (1) 복합 굴절차의 단면 크기 결정과 같은 기본 설계에서 고려되어야 할 것들은 고려하였음에도 불구하고 국부적인 응력이 항복 강도를 초과하는 부분들이 발생하지만, 해당 부재의 두께나 붐의 단면 형상을 관성 모멘트가 큰 구조로 변경하는 등의 방법으로 응력의 과다 발생을 방지할 수 있을 것으로 판단된다.
- (2) 특히 JIB 붐과 바스켓 지지대의 연결부, 6번 붐과 JIB 붐의 연결 부에서 과다한 응력이 발생하고 있으며, 해당 부재의 두께를 증대시키고 구멍 주위의 형상을 변경하는 방법으로 응력의 완화를 유도할 필요가 있다.
- (3) 본 연구 결과를 통하여 68m 급의 성능 평가 기준 개선 안으로 이에 대한 기술 기준을 확보하였으며, 아파트의 고층화에 따른 인명구조 및 화재진압에 대응할 수 있는 복합 굴절차의 개발로 화재 저감에 크게 기여할 수 있다.
- (4) 또한 복합 굴절차에 대한 구조 해석을 통한 안전성을 검증할 수 있는 수치해석 툴의 확립으로 향후 소방용 굴절차의 성능 평가의 신뢰성을 확보할 수 있는 기술 축적과 소방차의 검수에 필요한 자료를 제공할 수 있다고 판단된다.

References

- (1) Innosimulation Inc., 2005, *Development of Operation Training Simulator for High-rise and Aerial-lift Fire Engine*, Small & Medium Business Administration, Korea.
- (2) Kim, H. G., Nah, S. C., Hong, D. P., and Cho, N. I., 2007, "A Study on the Optimal Design for Aluminum Boom Shape in High Ladder Vehicles," *Transactions of the KSMTE*, Vol. 16, No. 3, pp. 96~102.
- (3) Everdigm Co., 2012, *A Study in the Multi-aerial Platform for Life-saving with Extinguish to High-rise*

- Fire*, National Emergency Management Agency R&D, Korea.
- (4) Kim, M. S., Lee, J. C., Jeong, S. Y., Ahn, S. H., Son, J. W., Cho, K. J., Song, C. K., Park, S. R., and Bae, T. H., 2008, "Structure Evaluation for the Level Luffing Crane' Boom," *Transactions of the KSME(A)*, Vol. 32, No. 6, pp. 526~532.
- (5) Reddy, J. N., 1993, *An Introduction to the Finite Element Method*, McGraw-Hill Inc.
- (6) Park, C. H., Kim, B. W., Ha, M. K., and Chun, M. S., 2005, "A Basic Structural Design for Large Floating Crane," *Transactions of the KSOE*, Vol. 19, No. 1, pp. 71~76.
- (7) Yoo, K. S., Park, J. W., Hidaka, S., and Han, S. Y., 2010, "Optimum Design of Movable Hydraulic Crane Booms," *Transactions of the KSMTE*, Vol. 19, No. 6, pp. 776~781.
- (8) Kim, S. Y., Bae, H. S., Lee, Y. H., and Park, M. K., 2007, "Computer Simulation for Residual Life Expectancy of a Container Crane Boom Structure," *Transactions of the KSPE*, Vol. 24, No. 9, pp. 119~129.
- (9) Lim, H. B., Shin, M. K., and Yang, H. I., 2012, "Structural Optimization of the Knuckle Crane Installed in Truck," *Transactions of the KSMTE*, Vol. 21, No. 2, pp. 344~348.
- (10) Ko, J. C., Park, Y. S., and Kang, I. S., 2011, *NX 7.5 CAE Bible [NX Nastran]*, Onsia, Korea.
- (11) BSI, 2010, *EN1777:2010, Hydraulic Platforms(HPs) for Fire Fighting and Rescue Services- Safety Requirements and Testing*, BSI Standards Publication.