

복합굴절차의 하부 프레임에 대한 구조해석

강성수*

Structural Analysis of the Lower Frame in the Multi-aerial Platform

Sung-Soo Kang*

ABSTRACT

This research focuses on structural stability of the multi-aerial platform. In this study, we conduct structural analysis for the lower structures such as sub frame, out-trigger and chassis frame, by using a universal structural analysis program NASTRAN based on 3D CAD data, material properties, load conditions and boundary conditions. We confirm the position of local stress exceeding the yield strength, through structural analysis of 4 cases for load conditions. As the results, it is possible to relax stress concentration in a way such as changing the thickness, reinforcing the material of the lower frames.

Key words : Multi-aerial platform, Structural analysis, Finite element method, Frame, Out-trigger

요약

본 연구에서는 복합굴절차의 강도 해석을 통한 구조적 안정성을 평가하고자 한다. 3D CAD 데이터, 사용 재질에 대한 물성 값, 하중 조건 및 경계조건을 바탕으로, 범용 구조 해석 프로그램인 Nastran을 활용하여 복합굴절차에 대한 정적 구조 해석을 실시하였다. 하부 프레임(Sub frame, Out-trigger, Chassis frame)에 대한 구조해석을 수행하기 위해, 각 Out-trigger가 최대 하중을 받는 4가지 경우를 산정하였다. 이러한 해석된 결과를 통하여 국부적으로 강도가 부족한 위치를 특정지어, 보다 안전한 설계에 도움이 되도록 하였다.

주요어 : 복합굴절차, 구조해석, 유한요소법, 프레임, 아웃트리거

1. 서론

최근의 건축물은 사무공간 뿐만 아니라 주거공간을 위한 건축물조차 초고층화되어 가고 있으며, 초고층 건축을 위한 다양한 공법들이 개발되는 동시에 신재료라고 부를 수 있는 고강도 콘크리트의 개발이 이어지고 있다. 이러한 건축공법의 발전에 따라 이전에 비하여 대부분의 건물들은 고층화가 급속하게 진행되어 왔다. 그러나 이러한 고층화와 더불어 초고층 건물의 화재에 대한 대비책은 발전의 보조를 맞추지 못하고 있는 것이 현실이다. 최근 초고층 화재와 관련한 연구들은 주로 연돌효과, 굴뚝효과

등이 추가 되는 제연설비 및 가압방식 등에 대한 연구가 주를 이루고 있으며, 실제 화재 발생 시 화재진압을 위해 투입될 수 있는 화재진압장비는 아직 미비하다^{1), 2)}.

이처럼 건물의 고층화에 따른 화재의 위험성은 급격하게 증대하고 있으며, 화재 시 예상되는 인명 및 재산피해는 대형화로 이어질 가능성이 매우 크다. 특히, 아파트나 주상복합건물과 같은 주거 공간에 있어서의 인명피해는 곧 대형인명피해로 이어진다고 해도 과언이 아니다. 이와 같은 환경에서의 인명 구조 및 화재 진압에 매우 도움이 되는 장비가 고가 사다리차나 굴절차가 될 것이다. 그러나 고가 사다리차는 사다리의 전개에 있어 주거환경에 따라 그 활동기회가 박탈될 때가 많은 것이 현실이다. 따라서 고가의 굴절이 가능한 복합굴절차는 이러한 제약을 극복할 수 있는 대안이 될 수 있다^{3)~5)}.

국외에서는 다양한 높이의 복합굴절차가 개발되고 있는데, 짧게는 23m부터 길게는 112m가 되는 복합굴절차

Received: 26 July 2015, **Revised:** 10 September 2015,
Accepted: 17 September 2015

***Corresponding Author:** Sung-Soo Kang

E-mail: sskang@jj.ac.kr

Jeonju University, Mechanical and Automotive Engineering

가 개발되어 현장에서 사용되고 있다. 국내외의 기준 차이로 인하여 수입품의 경우 같은 제품이라도 검정형식 면제로 인한 유리한 상황이 전개되고 있다. 국내의 경우 동장비의 기립각 80도, 굴절각 135도로 법규적 제한 있으나 수입품의 경우 기립각 90도 굴절각 180도로 하더라도 문제없는 실정이며 이는 우리나라 제품의 국제적 경쟁력을 약화시키는 결과로 나타나 제도적으로 국제적 환경에 맞추어 바뀌어야 할 부분이 있다²⁾.

본 연구에서의 설계 대상은 국내의 도로 폭 및 도로 환경을 고려하여 최대 높이가 68m 정도로 산정하여 개발하고자 한다. 이와 관련한 이전의 연구에서 정적 하중과 부가 하중, 풍하중 및 과하중 상태에 있는 굴절 사다리차의 상부 프레임에 대한 구조적 안정성을 평가하였다^{6) 7)}. 본 연구의 목적은 소방용 복합굴절차의 하부 프레임에 대한 강도 해석을 통해 구조적 안정성을 평가함에 있다. 해석에 필요한 3D CAD 데이터, 사용 재질에 대한 물성 자료 및 해석 하중 조건을 바탕으로, 복합굴절차의 정적 구조 해석을 통하여, 유한요소해석법⁸⁾을 통한 구조 해석을 실시하였다. 범용 구조 해석 프로그램인 Nastran을 활용하여⁹⁾, 하부 프레임(Sub frame, Out-trigger, Chassis frame)에 대한 구조해석을 수행하였으며, 각 Out-trigger가 최대 하중을 받는 경우를 산정하여, 4 Case의 해석을 수행하였다. 이러한 해석된 결과를 통하여 국부적으로 강도가 부족한 위치를 특정지어, 보다 안전한 설계에 도움이 되도록 하였다.

2. 해석 조건

2.1 모델 설계

본 연구에서의 복합굴절차는 Fig. 1과 같이, 후 3축 Cab-chassis, 전후 좌우 4개의 Out-trigger 및 사다리차의

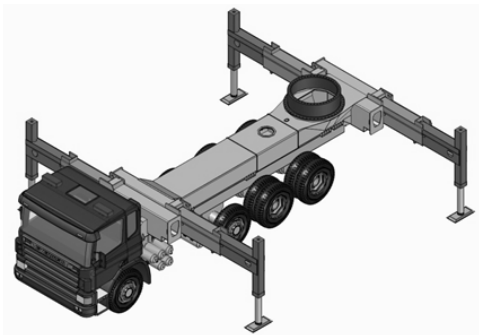


Fig. 1. Geometry of model

Table 1. Mechanical properties of each material

Material	Yield strength [N/mm ²]	Modulus of elasticity [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
S45C	370	207	0.29	7860

하부 구조 등으로 구성되어 있다. 뒤쪽의 등근 원통의 Turntable 위로 Boom 시스템이 장착되는 구조이다. 복합 굴절차의 설계에 대한 선진 기술의 접목을 위해 기본적으로 유럽의 굴절차 설계 및 안전 기준인 EN1777:2010을 채택하였다¹⁰⁾. EN1777:2010 규정은 소방 설비에 대해 CEN/TC192 유럽 기술위원회에서 제정한 것으로 이 유럽 규정은 유럽 전반에 걸쳐 사용하는 국제 규격이다.

하부 프레임을 구성하고 있는 구조물의 재료 물성치는 Table 1과 같으며, 대부분의 재질은 ATOS80으로 항복점과 탄성계수, 프와송비, 밀도 등을 바탕으로 모델링을 실시하였다. 재질로는 ATOS80, STE690, STE890, SM490A, SCM415, S45C, MC901을 사용하였으며, 각각의 재질이 적용된 부분으로는 대부분의 판재, Ring gear bracket, Out-trigger 연결부, Reinforce와 Dummy, 마개 류, Cylinder cover 류, Pad 류에 사용되었다. 하부 프레임 모델에 대한 구조해석을 실시하기 위해, Fig. 2와 같이 하중의 위치별로 4 Case에 대해 해석 모델링을 실시하였다. 또한 하부 프레임을 구성하고 있는 각 파트별 구조물은 Fig. 3과 같다.

2.2 유한요소모델

유한요소 모델은 0D, 1D, 2D 및 3D 요소를 혼용하여 구성하였다. 각 부재별로 사용한 요소들의 종류는 해석에 사용된 범용프로그램인 Nastran을 기반으로 한 것이다.

요소의 크기는 2D 및 3D 요소에 대하여, 20mm이내로 모델링하였으며, 이는 각 부품의 각 방향에 대하여, 최소 요소를 2개~4개를 유지하도록 하기 위함이었다. 전체 모델링된 절점과 요소의 수는 각각 398,263개 및 375,895개로 구성되었다. 각 파트별 절점과 요소수를 Table 2에 나타내고 있다.

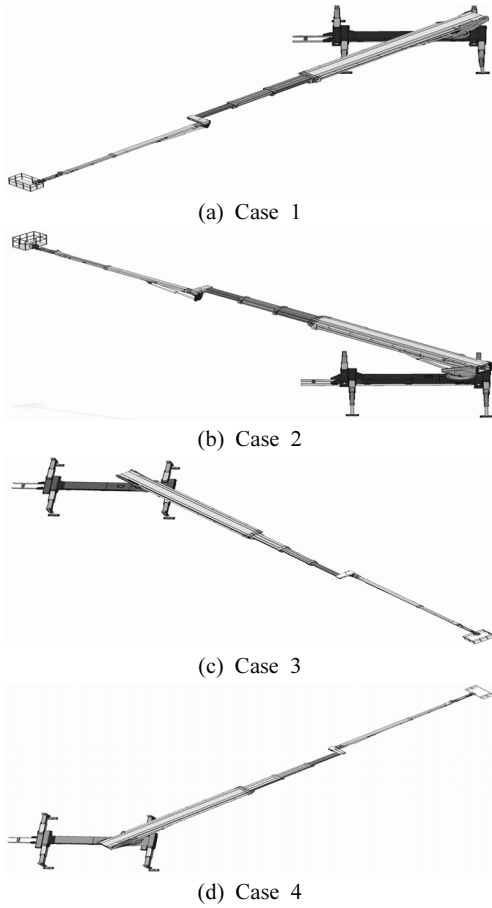


Fig. 2. Loading condition for each case

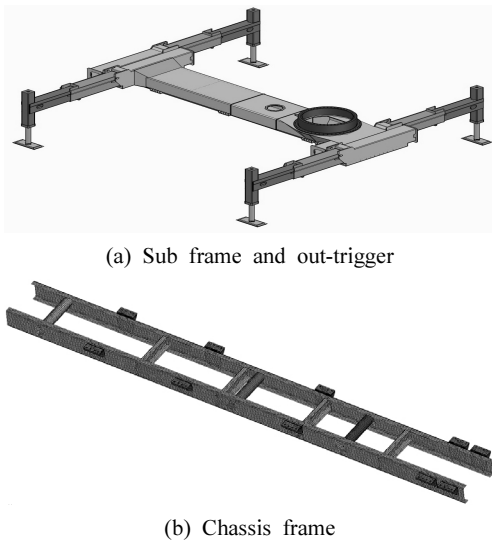


Fig. 3. Each part of lower frame

Table 2. Number of node and element

Part	Node	Element
Sub frame	193,290	185,341
Out-trigger	170,900	157,383
Chassis frame	34,393	32,922
Link etc.	-	249
Total	398,263	375,895

Table 3. Mass of CAD model and FE model [kg]

Part	CAD	FE	Difference
Sub frame	6,835	3,924	2,911
Out-trigger	3,476	2,817	659
Chassis frame	1 axis	4,760	-
	Pusher	1,000	-
	Boggy	4,090	-
Total	370	207	0.29

2.3 하중 조건

유한요소 모델에 대해 계산된 각 시스템별 중량과 CAD 데이터로 구한 중량을 비교한 결과, Table 3과 같이 유한요소 모델에 대한 중량과 CAD 데이터에 대한 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 CAD 데이터와 일치하도록 조정하여 해석을 수행하였다.

본 연구에서는 Fig. 4와 같이 4가지 자세에 대한 해석을 수행하여, 총 4개의 Case가 존재한다. 4가지 자세는 각 Out-trigger가 최대 하중을 받는 자세를 고려한 것이며, 이는 기본적인 차량 설계로부터 안정도 검토가 필요한 자세를 도출하여 제시한 것이다. Case 1은 수평면에 대하여 Boom 시스템이 34.1 deg, Case 2는 37.3 deg, Case 3는 56 deg, Case 4는 52.7 deg 기울어진 것이다.

2.4 경계 조건

경계 조건은 Fig. 5와 같이 Out-trigger의 끝단이 지면에 접촉되는 점을 각 조건별로 고정시키는 것이며, 이를 Table 4에 나타낸 바와 같이, 각 숫자는 고정되는 자유도를 의미하며, 예를 들어 1은 Tx, 2는 Ty, 3은 Tz를 의미

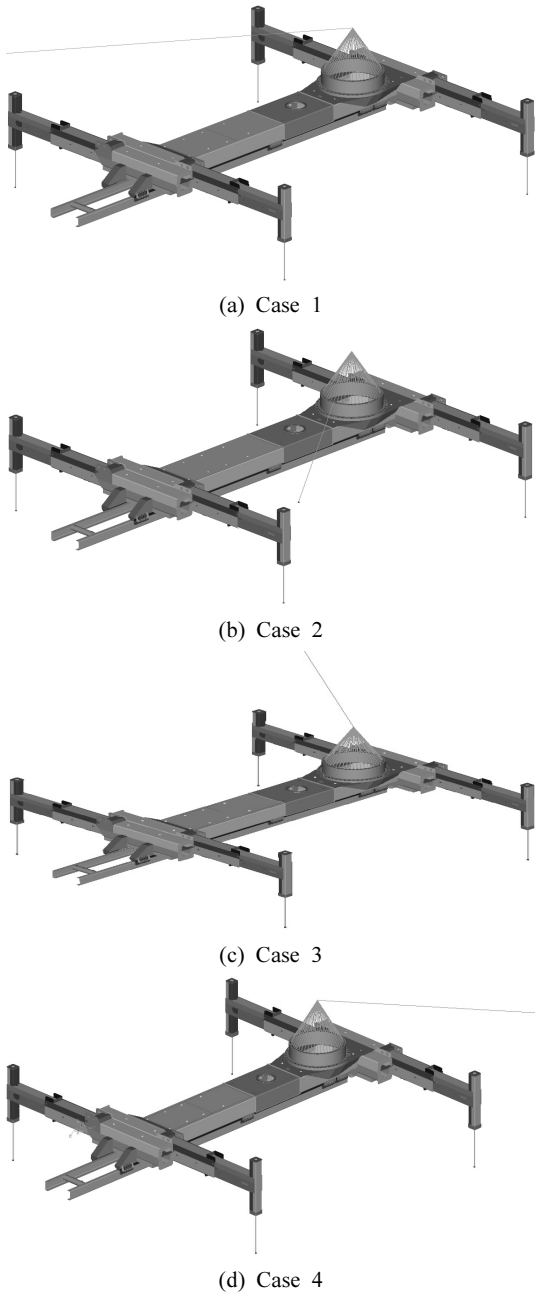


Fig. 4. Loading condition

하고, 4,5,6은 회전에 대한 자유도를 나타내고 있다.

2.5 반력 계산

Fig. 6과 같이 4개의 각 Out-trigger가 최대반력을 이루는 조건은 장비의 고정중량(하부중량)중심과 선회부 중

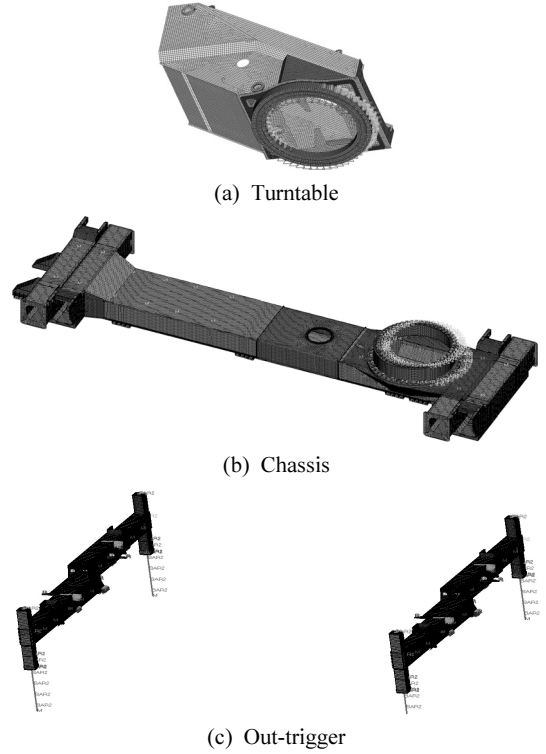


Fig. 5. Boundary condition

Table 4. Boundary condition of each case

	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4
Case 1	123456	1356	-	36
Case 2	1356	123456	36	-
Case 3	36	-	1356	123456
Case 4	-	36	123456	1356

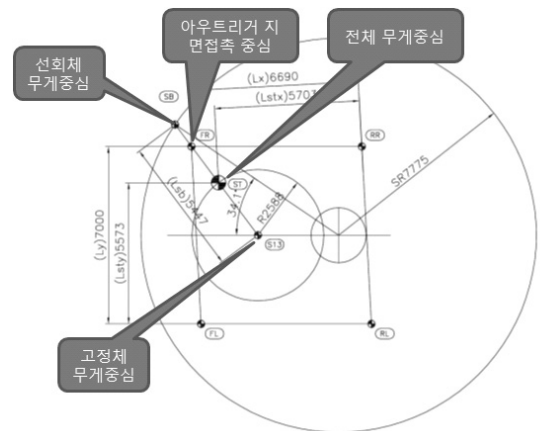


Fig. 6. Calculation of reaction force for out-trigger

Table 5. Reaction force of each out-trigger [kg]

	FR Max.	FL Max.	RR Max.	RL Max.
FR	24,154	7,773	2,967	0
FL	7,592	24,613	0	3,807
RR	5,494	0	31,948	2,985
RL	0	7,773	2,325	30,448

량(Boom)중심, 그리고 Out-trigger가 지면접촉 중심간 일직선이 이루어질 때 해당 Out-trigger의 반력이 최대 하중값을 가지게 된다. 이때 선회체 중량조건은 선회체의 전도 방향 모우먼트가 가장 높게 나타난 Case 1에서 산출된 모우먼트값을 적용하여 Table 5와 같이 각 Out-trigger의 최대 반력이 산출되었고 이때 붐의 전개방향 반대편 Out-trigger의 지면접촉 하중은 0로 가정하여 산출 되었다. 여기서 FR은 전방우측, FL은 전방좌측, RR은 후방우측, RL은 후방좌측을 나타내고 있다.

3. 해석 결과

3.1 변형

본 해석에서는 변위 해석 결과를 나타내었다. 여기서, 해석 결과를 수직 방향으로 나타낸 것은 각 Out-trigger의 끝단이 지면으로부터 이탈되는가 하는 것을 평가하기 위한 것이다. 아래에 Table 6과 Fig. 7의 Case 3에 대한 변위 해석 결과를 참조하면, 모든 하중 Case에서 Boom이 위치한 대각선 방향의 Out-trigger는 모두 지면에서 이탈되는 것으로 나타난다. 그 변위 값은 최소 19.9mm에서 최대 122.4mm 이다.

3.2 반력

각 하중 조건에 따른 반력을 Table 7과 같이, 각 Case 별 최대 반력을 나타내었다. 최대 반력은 약 25ton에서 30ton 정도로 나타났다. 최대 반력은 Boom이 후방 좌측

Table 6. Maximum vertical deflection of lower frame for each case [mm]

Loading	FR	FL	RR	RL
Case 1	-	-	-	113.7
Case 2	-	-	122.4	-
Case 3	-	27.4	-	-
Case 4	19.9	-	-	-

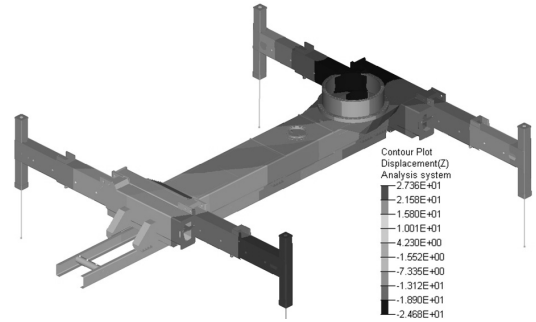


Fig. 7. Deformation of lower frame for case 3

Table 7. Maximum reaction force for each case [N]

Loading	FR	FL	RR	RL
Case 1	2.534E5	6.391E4	5.347E4	-
Case 2	5.587E4	2.689E5	-	4.601E4
Case 3	3.740E4	-	3.221E5	1.133E4
Case 4	-	4.686E4	1.768E4	3.063E5

에 놓일 경우에 나타남을 알 수 있고 전방을 향했을 경우에는 Boom이 전방 좌측을 향할 경우로 나타났다.

3.3 응력

응력 해석에서는 해석 결과를 각 시스템별로 분리하여, Sub 프레임 재질과 Out-trigger 재질에 대해 각각 Table 8과 Table 9에 정리하였고 항복강도 보다 큰 응력이 발생한 위치를 특정하였으며, 해석 프로그램에서 도출된 값들을 나타내었다. 응력의 분포를 나타내는 Fig. 8에서는 Case 3에 대한 결과를 도시하고 있다.

Case 1에 대한 해석 결과를 분석해 보면, Table 8의 Sub 프레임의 경우, ATOS80와 STE890 재질에 대해 2번 FR Out-trigger가 접촉되는 하단부에서 응력이 항복

Table 8. Maximum stress for each case of sub frame

Material	Yield strength [N/mm ²]	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4
ATOS80	700	738.2	822.6	967.1	933.5
SCM415	686	128.8	71	5.7	449.7
SM490A	325	248.5	256.1	79.2	79.2
STE690	677	235.9	249.4	314.7	321.6
STE890	883	771.3	710.9	811.7	988.1
STPG38	215	235.5	256.4	115.8	121.8

Table 9. Maximum stress for each case of out-trigger

Material	Yield strength [N/mm ²]	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4
ATOS80 ¹⁾	700	816.2	831.3	905.0	953.1
ATOS80 ²⁾	700	816.2	718.2	897.6	806.8
S45C	370	139.5	138.9	160.9	157.9
SCM415	686	134.5	149.2	175.6	171.0
STE890	883	366.8	385.4	459.8	472.7

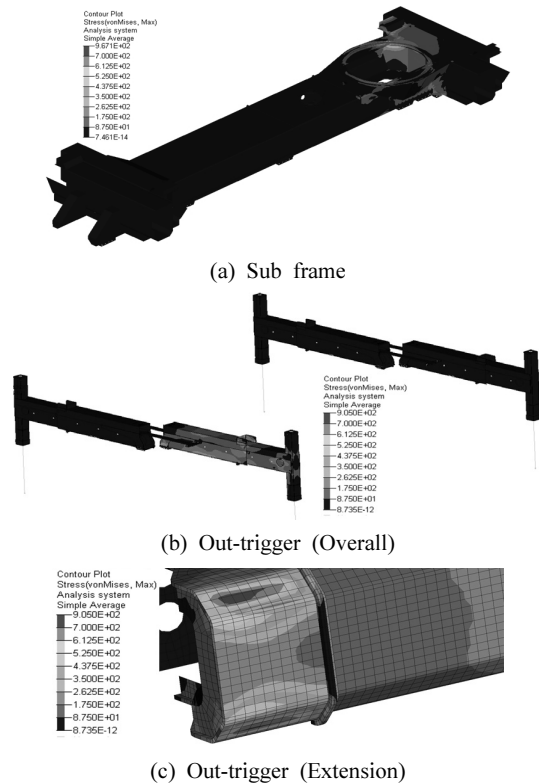


Fig. 8. Stress distribution of lower frame for case 3

강도를 약간 상회하는 것으로 나타났다. 또한 STPG38 재료에 대해서도 항복강도를 약간 상회하는 응력을 나타낸다. 이에 대한 보강 또는 재질 변경이 필요할 것으로 보인다. Out-trigger에서는 Table 9의 ATOS80¹⁾에 해당하는 Cylinder cover와 Out-trigger 연결지점에서 항복강도 이상을 응력을 보인다. 이에 대한 변경도 고려하여야 할 것으로 보인다. 기타 대부분의 재질에 대해서는 항복강도 이내의 응력을 나타냈다.

Case 2에 대한 해석 결과를 분석해 보면, Case 1과 같

이, Sub 프레임에서는 2번 FR Out-trigger가 접촉되는 하단부에서 응력이 항복 강도를 상회하는 것으로 나타났다. 또한 STPG38 재질의 파이프로 항복 이상의 응력이 나타난다. Out-trigger의 경우, 전술한 Case 1과 유사한 특성을 보인다. 하지만, Table 9의 ATOS80²⁾에 해당하는 2번째 FL Out-trigger가 접촉하는 하부 끝단의 응력도 높게 나타났다.

Case 3에 대한 해석 결과를 Case 1 및 Case 2와 비교하면, 거의 동일한 부위에서 항복을 넘는 응력이 나타나는 경향을 갖지만, Case 3가 최대 응력이 가장 크게 나타남을 알 수 있었다. Case 4에 대한 해석 결과를 분석해 보면, 앞의 Case들과 비교하면, 거의 동일한 부위에서 항복을 넘는 응력이 나타났다.

4. 결론

본 연구에서는 소방용 복합굴절차의 강도 해석에 필요한 CAD 데이터, 사용 재질에 대한 물성 자료 및 해석 하중 조건을 바탕으로, 유한요소해석법을 이용하여 복합굴절차의 하부 프레임에 대한 정적 구조 해석을 실시하였다. 이를 위해 범용 구조 해석 프로그램인 Nastran을 활용하여, 하부 프레임에 대한 구조해석을 수행하였고, 각 Out-trigger가 최대 하중을 받는 경우를 산정하여 해석을 수행한 결과, 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

- (1) Sub 프레임의 경우, Ring gear를 지지하는 Bracket이 안착되는 부분의 응력이 항복 응력을 크게 상회하는 것으로 나타났다. 모델링기법 상 프레임에서 볼트 연결 홀에 대한 모델링을 보다 상세하게 처리함으로써 이에 대한 응력의 저하가 가능할 것으로 판단된다.
- (2) 하부 프레임의 변위해석은 각 Out-trigger의 끝단이 지면으로부터의 이탈유무를 평가하기 위한 것으로, 하부 프레임에 대한 구조해석 결과, 모든 하중 Case에서 Boom이 위치한 대각선 방향의 Out-trigger는 모두 지면에서 이탈되는 것으로 나타났다. 그 변위 값은 최소 19.9mm에서 최대 122.4mm 이었으며, 최대 반력은 약 25ton에서 30ton으로 나타났다.
- (3) 하부 프레임의 응력 해석 결과, 항복응력을 초과하는 부분을 정리하면, 항복점 이상의 응력이 발생한 부분은 ATOS80 사용부분(2nd FR, FL, RR, RL Outtrigger가 접촉되는 하부), STE890 사용부분(2nd FR, FR, FL, RR, RL Out-trigger와 접촉되는 상부), Out-trigger에서 ATOS80 사용부분(Cylinder cover와 Out-trigger

연결지점 및 2nd FL, RR, RL Outtrigger 와 접촉되는 하부 끝단)으로 Case 1 ~ Case 4에 걸쳐 동일하게 나타났다.

- (4) 전체적인 구조 해석 결과는 복합굴절차의 하부 구조물에 대해 재질별로 다소 차이가 있고 국부적으로 취약부가 존재 하는 것으로 나타났으나, 대부분이 안전율 1.5 이상임을 알 수 있었다. 특히 취약한 부분으로는 Ring gear bracket과 프레임이 맞닿는 부분과 Out-trigger 부분에서 응력이 높게 나타났으므로 이에 대한 보강이 필요하다고 판단된다. 이를 위해, 일부 부재를 연결하는 부위에서 응력 값이 크게 산출되어, 상세 검토로 강도를 보강하는 설계 변경이 필요 요구된다. 특히, Out-trigger가 접촉되는 하우징 하단부 Leg 접촉면 바깥쪽에 보강을 통하여 개선할 수 있고, Cylinder와 Out-trigger 연결부에 대해서도 이에 대한 설계 개선과 재질의 변경으로 개선이 가능하다.
- (5) 영구변형이 발생하는 부분에 대해 구조적인 보강이 필요할 것으로 판단되지만, 범용 구조 해석 프로그램의 해석기법 상에 메쉬 등의 크기 및 접촉 조건에 따라 달라질 수 있으므로 추가적으로 면밀한 검토와 신뢰도 평가가 필요하다. 본 연구 결과를 바탕으로 향후 보다 진전된 연구를 수행하여 복합굴절차의 구조적 안정성(강도, 변형, 롤링 현상, 피로 등)을 확보하고 필요시 소재의 경량화를 고려함으로써 국내의 시장에 대한 적용을 높이고자 한다.

References

- Inno simulation Inc. (2005), Development of Operation Training Simulator for High-rise and Aerial-lift Fire Engine, Small & Medium Business Administration, Korea.
- 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.
- M.S. Kim, J.C. Lee, S.Y. Jeong, S.H. Ahn, J.W. Son, K.J. Cho, C.K. Song, S.R. Park, T.H. Bae (2008), "Structure Evaluation for the Level Luffing Crane' Boom", *Journal of the Korean Society of Mechanical Engineers(A)*, Vol. 32, No. 6, pp. 526-532.
- Y.C. Kim, J.K. Hong, K.W. Jang (2011), "Lightweight Crane Design by Using Topology and Shape Optimization", *Journal of the Korean Society of Mechanical Engineers(A)*, Vol. 35, No. 7, pp. 821-826.
- S.Y. Kim, H.S. Bae, Y.H. Lee, M.K. Park (2007), "Computer Simulation for Residual Life Expectancy of a Container Crane Boom Structure," *Journal of the Korean Society for Precision Engineers*, Vol. 24, No. 9, pp. 119-129.
- S.H. So, S.S. Kang (2012), "Structural Analysis of Booms and Basket in the Multi-aerial Platform", *Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers*, Vol. 21, No. 6, pp. 885-891.
- S.H. So, S.S. Kang (2013), "Structural Analysis of Multi-aerial Platform under Overload", *Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers*, Vol. 22, No. 6, pp. 901-907.
- J.N. Reddy (1993), *An Introduction to the Finite Element Method*, McGraw-Hill, New York.
- J.C. Ko, Y.S. Park, I.S. Kang (2011), NX7.5 CAE Bible [NXNastran], Onsia.
- BSI (2010), EN1777:2010, Hydraulic Platforms(HPs) for Fire Fighting and Rescue Services-Safety Requirements and Testing, BSI Standards Publication.

1. Inno simulation Inc. (2005), Development of Operation



강 성 수 (sskang@jj.ac.kr)

1998 부산대학교 기계설계공학과 학사

2000 Univ. of Tokyo 환경해양공학과(구조역학) 석사

2003 Univ. of Tokyo 환경해양공학과(구조역학) 박사

2006 ~ 현재 전주대학교 기계자동차공학과 부교수

관심분야 : 전산역학, 구조설계, 수치해석