

# 승용 전기차 화재진압을 위한 크레인의 동적해석

김다겸, 박태빈, 이창환, 김진수  
 전주대학교 기계공학과  
 e-mail: jskim@jj.ac.kr

## Dynamic analysis of crane for extinguishing fires in electric passenger cars

Da-Kyeom Kim, Tae-Been Park, Chang-Hwan Lee, Jin-Soo Kim  
 Dept. of Mechanical Engineering, Jeonju University

### 요약

본 논문에서는 승용 전기차 화재 시 사용되는 크레인의 안전성과 성능을 연구하였다. 크레인 모델은 붐의 길이가 9m이고, 붐 선단의 하중이 24.5kN인 극한상황으로 진행하였으며, 이는 실제의 사용환경을 고려하여 측정된 값이다. 붐의 재질은 ATOS80, 패드의 재질은 GUR으로 가정하였으나, 패드의 재질은 해석에 큰 영향을 미치지 않는다고 판단하여 붐과 패드의 일체형 모델을 사용하였다. 또한, 크레인의 그랩방식이 힌지인 경우와 집게인 경우로 나누어 구조해석과 동적해석을 수행하였으며, ADAMS에 사용될 붐 유연체의 신뢰성 검증을 위해 동일한 경계조건에서 ANSYS와 ADAMS의 구조해석 결과를 비교하였다. 힌지방식 크레인의 경우, 최대 응력은 구조해석 결과 상부 굴절부에서 최대 650.72MPa, 붐에서는 최대 510.23MPa이며, 동적해석 결과 붐에서 566.54MPa이다. 집게 크레인의 경우 최대 응력은 구조해석 결과 상부 굴절부에서 최대 427.32MPa, 붐에서는 최대 412.50MPa이며, 동적해석 결과 붐에서 466.28MPa이다. 해석 결과, 붐의 최대응력은 ATOS80의 항복응력인 700MPa를 하회한다. 그러나 높은 안전성이 필요한 경우, 일부 재질과 상부 굴절부는 DOMEX960이 적합하며, 집게방식이 힌지방식보다 더 안정적인 것으로 판단된다.

## 1. 서론

전 세계적으로 이산화탄소 배출을 줄이기 위한 전략으로 전기차 보급 확대 정책을 추진하여 전기차 사용량이 증가하고 있다. 이에 따라 전기차의 안전 문제에 대한 중요성이 부각되고 있는데, 특히 차량 화재 발생 시 내연기관 차량과는 다른 연소 특성으로 인해 별도의 화재 진압 장비가 필요하다. 본 연구는 이러한 문제에 대응하여 승용 전기차의 화재 발생 시 사용할 크레인의 안정성 및 성능 검증을 목표로 하여, Fig. 1A의 4단 붐 크레인의 구조해석과 동적 해석을 수행하였다. 최대로 인출한 4단 붐 크레인의 극한 상황으로서 붐의 최대 길이가 9m이고, 붐 선단의 하중이 2,500kg의 승용 전기차를 고려하여 24.5kN으로 설정하고 해석을 수행하였다. 실제 모델에서 붐 사이의 패드의 재질만 UHMW-PE(GUR)이며 나머지 재질은 ATOS80으로 가정하였다. 전체 모델 해석에 앞서 패드의 재질을 UHMW-PE, 황동, ATOS80으로 변화시키며 Fig. 1B의 붐 모델의 응력 변화를 측정하였다. Table 1은 패드의 재질의 주요 물성치와 재질에 따른 붐의 최대 응력 값을 나타낸다. 응력 값의 차이는 일반적인 패드 재질인 황동의

경우 37.35MPa로 나타났으며, 실제 사용될 재질인 UHMW-PE과는 9.58MPa의 차이를 보인다. 패드의 재질은 해석에 큰 영향을 미치지 않는다고 판단하여, 본 논문에서는 붐과 패드를 같은 재질을 가진 일체형으로 변경하여 해석을 수행하였다.

Table 1. The Properties and Analysis Results of the Pads

Material	Properties			Max Stress [MPa]
	Density [kg/m <sup>3</sup> ]	Yield Strength [MPa]	Poisson's Ratio	
GUR	940	0.93	0.33	469.72
BRASS	8600	300	0.3	441.95
ATOS80	7850	221.4	0.27	479.30

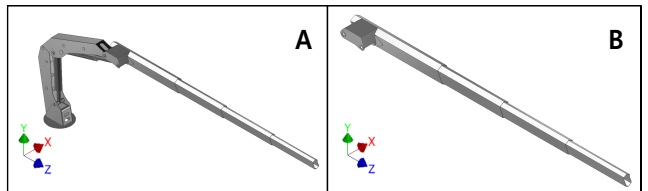


Fig. 1. The Entire Crane Model(A), Boom Model(B)

## 2. 연구 방법

### 2.1 ANSYS 구조 해석

#### 2.1.1 크레인의 구조적 안전성 해석

크레인 전체 모델의 안전성을 검증하기 위해 구조해석 프로그램 ANSYS를 사용하여 해석을 진행하였다. Fig. 2는 해석 모델을 나타내며, 턴테이블의 하단면인 ㉑ 면을 고정한 후 붐의 선단에 24.5kN의 하중을 가했다. 전체 모델에서 최대응력은 상부 굴절부에서 650.72MPa 발생하였으며, 4개의 붐 중에서 최대 응력은 510.23MPa이다.

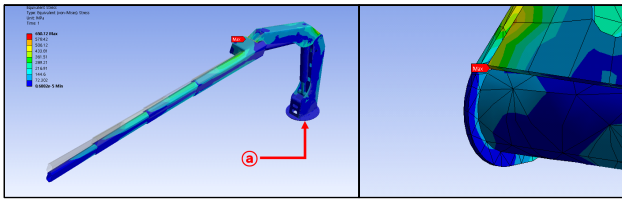


Fig. 2. ANSYS Crane model and the location of maximum stress

#### 2.1.2 텔레스코픽 붐의 유연체 변환

현실적인 동적인 해석을 수행하기 위해서, ADAMS를 사용한 크레인의 동적 해석은 구조적으로 가장 취약한 텔레스코픽 붐을 유연체 모델링한 후 해석을 수행하였다. 붐의 유연체 변환은 ANSYS의 Mechanical APDL 프로그램을 사용하였다. 최대 응력은 1번 붐(상부 굴절부와 연결되는 안쪽 붐)에서 발생했지만, 최대 응력의 위치가 변할 수 있으므로 모든 붐의 응력 값을 확인하기 위해 붐 전체에 대해 유연체 변환을 진행하였다. 이를 통해 생성된 유연체를 적용하여 2.1.1절의 해석과 동일한 조건(㉑지점 고정 및 붐 선단의 24.5kN 하중)에서 해석을 수행한 결과, ADAMS에서도 최대 응력이 511.65MPa로 유사하게 하였다. 이는 ANSYS를 통한 유연체 변환의 해석 타당성을 뒷받침한다.

### 2.2 ADAMS 동적 해석

#### 2.2.1 하중을 가하는 방식에 따른 응력 차이

크레인의 해석 이전에, 붐 선단에 하중을 가하는 방식과 하중 동일한 무게를 가진 물체를 연결하는 방식에 따른 응력 차이를 비교하기 위해 Fig. 3의 붐을 간략화한 모델을 사용하였다. 모델의 길이는 2m이고 하중은 24.5kN으로 가했으며, 70 초에 걸쳐 전체 모델이 위로 움직이는 동작을 추가하여 해석을 수행하였다. Table 2는 해석 결과를 나타내며, 하중에 의한 정적 해석과 동적 해석은 유사한 결과를 보이지만 물체를 연결한 동적 해석은 정적 해석에 비해 약 15MPa 높게 나오는 것을 확인할 수 있다. 이는 동적해석이 구조해석과 다르게 시

간에 따라 변화하는 하중에 대해 해석함으로써 물체를 연결하는 방식이 해석 결과에 타당하다 할 수 있다.

Table 2. ADAMS Results

Method		Max Stress [MPa]
ANSYS	Force	201.81
	Force	204.47
ADAMS	Object	217.68
	Connection	

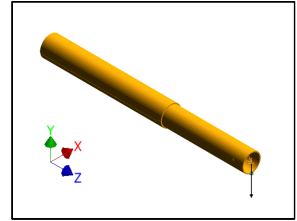


Fig. 3. simplified model

#### 2.2.2 작업하중을 고려한 크레인의 동적 해석

크레인의 동적 해석에서 붐 선단에 주었던 집중하중을 제거하고 2,500kg의 작업하중을 연결한 상황으로 모델링하였다. 작업차량의 무게와 크기(1730\*2060\*5890 mm<sup>3</sup>)는 국내 승용 전기차의 최대 크기와 하중을 고려하여 선정하였다. 크레인은 70초에 걸쳐 90° 회전을 하며, 작업차량을 수조에 인입 방식을 고려하여 위로 권상한 후 권하 동작을 수행하였다. Fig. 4B는 ADAMS 해석 모델이며, 해석 결과 최대 응력은 566.24MPa로 나타난다. 이는 구조해석과 마찬가지로 ATOS80의 항복강도를 하회한다.

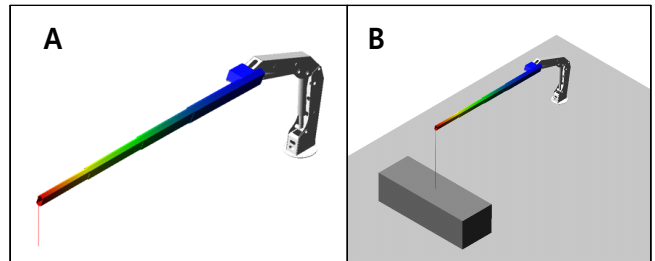


Fig. 4. ADAMS Crane Model(A), The model connected with an object(B)

### 2.3 그랩의 종류에 따른 해석

#### 2.3.1 ANSYS 구조 해석

먼저, 해석은 그랩의 종류가 힌지의 형태로 작업차량을 권상하는 방식으로 해석을 수행하였다. 그러나 그랩의 종류를 집계로 변경할 경우, 붐의 선단과 물체의 거리가 가까워지며 크레인의 자세가 변하게 된다. 따라서 해석 시에 중요한 점은 그랩의 형태가 아닌 크레인의 자세와 동작이라고 판단하여, 그랩을 별도로 모델링하지 않고 Fig. 5A에 보이는 것처럼 기존의 모델①에서 모델②로 변경하여 해석을 수행하였다. 동적 해석에서도 붐의 선단과 작업차량을 연결해주는 힌지방식의 와이어의 길이를 모델①의 3.5m에서 모델②의 0.4m로 변경하였다.

Fig. 5B는 구조 해석 결과를 보여주며, 최대 응력의 위치는 동일하게 상부 굴절부에서 발생하였지만 상세한 위치는 이전과 다르게 굴절부 후측 하단으로 변한다. 최대 응력은 전체

크레인에서 427.32MPa, 4개의 붐 중에서 최대 응력은 412.50MPa로 힌지방식 크레인 해석에 비해 약 100MPa 감소한다.

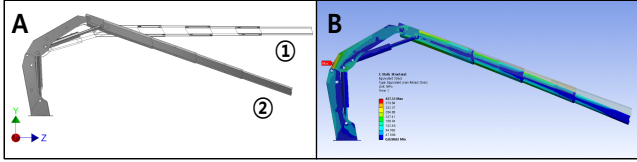


Fig. 5. The modified crane model(A), ANSYS Results(B)

### 2.3.2 동역학 해석

ADAMS에서 붐 유연체 변환의 신뢰성을 확보하기 위해 선단에 24.5kN의 하중을 주어 해석을 진행한 결과, 최대 응력은 406.20MPa로 구조해석 결과와 유사하게 나타났다. 동역학 해석을 진행한 결과, 최대 응력은 466.28MPa로 이전보다 안정적인 값을 보인다. 크레인의 동작은 동일하게 70초에 걸쳐 90° 회전을 하며, 작업차량을 동일 높이까지 권상하고 권하 방식으로 진행하였다. Fig. 6은 집게방식을 적용한 크레인의 모델을 보여주며, 두 해석 모두 구조해석의 응력에 동적 해석 값이 100MPa 높다. 실제 그래프가 결정된 후에는, 그에 맞게 모델을 수정하거나 붐 선단과 실험체의 길이를 조절하여 더 정확하게 크레인의 안전성을 검증할 수 있다.

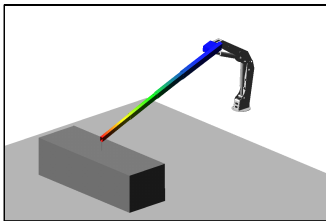


Fig. 6. ADAMS Crane Model

## 3. 연구 결과

### 3.1 결과 및 고찰

본 논문에서는 ANSYS와 ADAMS를 사용하여 텔레스코픽 붐 크레인의 안전성에 관한 구조해석과 동적 해석을 수행하였다. 크레인 작업 시의 극한 상황에 대해서 해석을 수행하였고, 붐의 재질은 ATOS80으로 선정하였으며, 구조해석 결과 최대응력은 650.72MPa, 동적 해석 결과 최대 응력은 566.24MPa로 나타났다. 해석 결과 모두 ATOS80의 항복응력 700MPa를 하회하지만, 안전계수 1.2를 적용할 때 붐은 수치적으로 안전하지만 상부 굴절부의 경우 항복 응력을 초과하는 최대 응력을 가지는 것을 확인하였다. 높은 안전성을 요구하는 경우, 안전계수를 1.5을 적용하여 계산하면 붐과 상부굴절부 모두 ATOS80의 항복응력을 초과한다. 따라서 일부 재

질은 항복응력이 960MPa로 더 높은 DOMEX960으로 변경하는 것이 더 안전할 것이다. 실제 사용되는 크레인의 경우, 승용 전기차의 평균 중량이 약 2,000kg 정도이고, 붐을 최대한 인출하여 해석을 진행했다는 점을 고려할 때, 실제 사용되는 크레인의 재질로 ATOS80을 사용해도 안전하다고 판단된다.

Table 2. Maximum stress results from ANSYS and ADAMS

	ANSYS		ADAMS	
	Entire	Boom	Force	Object connection
simplified		201.81	204.47	217.68
wire crane	650.72	510.23	511.65	566.24
gripper crane	427.32	412.50	406.20	466.28

### 3.2 후기

본 논문은 행정안전부(한국산업기술기획평가원)의 지역맞춤형 재난안전 문제해결 기술개발 사업의 지원을 받아 진행된 연구(과제번호 1223 0135)입니다.