

## 구난장갑차 크레인 브래킷에 대한 구조건전성 평가

### Structural Integrity Evaluation for Crane Bracket of Armored Recovery Vehicle

정재웅*	정운화*	김천수**
Jae-Woong Jung	Un-Hwa Jung	Cheon-Soo Kim
유영수*	박경철*	박기철*
Young-Soo Yu	Kyung-Chul Park	Ki-Chul Park

#### ABSTRACT

For towing the new type armored vehicle and maintaining the close support, the armored recovery vehicle(ARV) with winch and crane has been developed. In case of crane, it is mainly used to salvage heavy objects by rotational and vertical motion. Especially, the crane bracket is very important parts due to fixing the ARV's body and rotary joint and preventing the force rotation of crane. Therefore, the crane bracket needs to have an enough strength to endure the high load and it is very important to analyze the stress distribution under loads.

In the present work, the experimental and analytical investigation on structural integrity evaluation of crane bracket were carried out. The simulation of three-dimensional finite element method(FEM) was compared with experimental datum. From the numerical results, the FEM simulations corresponded well with th experimental results and the structural safety was confirmed by safety factor.

Keywords : Finite Element Analysis(유한요소해석), Salvage Crane(구난크레인), Structure Analysis(구조해석), Operation Load(동작하중), Structural Evaluation Test(구조강도시험), Armored Recovery Vehicle(구난장갑차)

#### - 기호설명 -

$\theta_1, \theta_2, \theta_3$  : 각도  
 $\theta_p$  : 주응력/주변형률 각도

$\varepsilon(\theta_1), \varepsilon(\theta_2), \varepsilon(\theta_3)$  : 계측된 변형률  
 $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$  : 축 변형률  
 $\gamma_{xy}, \gamma_{yz}, \gamma_{zx}$  : 전단 변형률  
 $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$  : 축 응력  
 $\tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}$  : 축 전단응력  
 $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  : 주 응력  
 $\sigma_{equ}$  : 등가응력  
 $\sigma_{eff}$  : 유효응력

† 2013년 6월 18일 접수~2013년 9월 13일 게재승인  
 \* 국방기술품질원(DTaQ)  
 \*\* 두산DST(Doosan DST)  
 책임저자 : 정재웅(jwjung@dtaq.re.kr)

- E : 탄성계수
- G : 전단계수
- $\nu$  : 포아송 비
- $\alpha$  : 열팽창 계수
- $\Delta T$  : 온도변화

## 1. 서론

구난장갑차의 주요목적은 신형 장갑차 견인 및 근접 지원정비로, 이를 수행하기 위해 윈치 및 크레인을 탑재하여 개발되었다.

윈치의 경우 장갑차가 임무수행 중에 언덕이나 경사지에서 굴러 떨어져서 손상되어 기동불능이 되거나 습지나 수렁 등에 빠져서 자력으로 빠져나오지 못하는 경우에 신속하고 안전하게 끌어 올리는 역할이다. 이를 위한 선제조건으로 피구난 대상 장비의 전투중량보다 동급 또는 그 이상의 자중을 확보해야 하며 경사지 견인, 웨도 잠김상태, 습지, 지면상태 등 구난상황에 따라 높은 견인능력이 필요하다. 따라서, 이러한 경우를 위해 화차(Pulley)를 사용하여 견인능력을 배가시켜 장비를 개발하였다<sup>[1]</sup>.

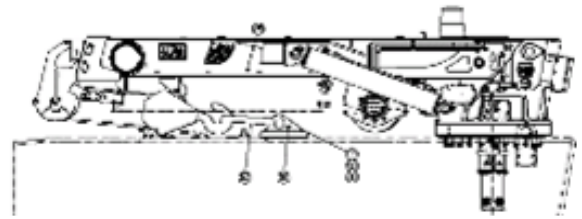
크레인은 주장비의 포탑, 동력발생장치 또는 현수장치 등이 파손되거나 고장이 발생하여 임무를 수행할 수 없을 때, 근접지원정비를 하거나 정비부대로 후송하기 위하여 각종 중량물을 인양하는 기능을 가지고 있다<sup>[2]</sup>. 이 크레인 회전운동과 상하운동을 위해서는 차체와 로타리 조인트를 고정하는 기능을 하는 브래킷이 필요한데, 이 부품은 크레인의 강제회전을 방지하고 로타리 조인트를 고정하는 기능을 가지는 중요한 부품으로 충분한 강도를 가질 수 있도록 적절한 설계가 필요한 부품이다. 만약 부품의 안전율을 과소평가 한다면 장비 파손의 심각한 문제를 발생시킬 수 있다.

본 연구에서는 구난장갑차의 중요 부품인 크레인의 브래킷에 대하여 해석 프로그램을 이용한 시뮬레이션 결과에 대한 해석을 실시하였으며, 그 결과를 실규모 구조시험한 결과와 상호 비교하여 구조설계 건전성을 평가하고 브래킷에 대한 설계 타당성을 제시하였다.

## 2. 구난장갑차 크레인 구조와 모델링

구난장갑차 크레인은 각종 Link와 Plate로 연결되어

있으며 그 구조는 Fig. 1과 같다. 구난크레인은 가동부와 지지부로 이루어져 있으며, 가동부(Arm)를 지지하는 지지부(Fig. 1 표시부분)의 내부구조는 Fig. 2와 같다. 구난크레인이 좌우로 회전하게 되면 로타리 조인트가 동작하게 되어 있고 브래킷에 의하여 강제회전을 방지하는 구조로 되어 있다. 또한, 인양물을 들어 올리는 작업에 있어서 로타리 조인트를 고정할 수 있게 되어 있다.



(a) Schematic of the salvage crane



(b) Picture of the salvage crane

Fig. 1. Structure of the salvage crane



Fig. 2. Structure of the supporting part with the bracket

유한요소해석에서 정확한 입력 데이터를 제공하기 위해서 유한요소해석을 위한 모델링을 범용유한요소 해석 프로그램인 I-DEAS 12 NX Series m4를 이용하여 실제 형상과 흡사하게 3차원적으로 모델링을 하였다. 2차원 모델링과는 달리 브래킷의 세부적인 형상까지도 표현을 할 수 있으며 해석의 정확도를 높일 수 있다. Fig. 3은 I-DEAS 12 NX Series m4를 이용한 3차원 크레인의 모델링의 전체 형상과 크레인의 세부 형상을 보여주고 있다.

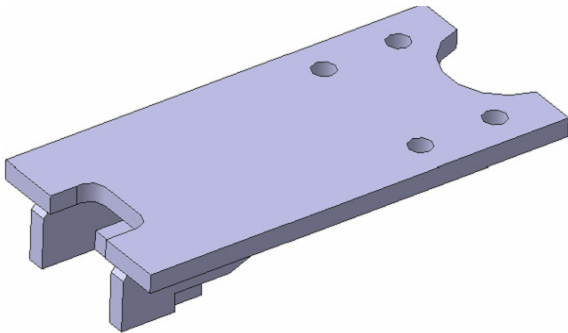


Fig. 3. 3D model of the bracket

### 3. 유한요소해석

I-DEAS 12 NX Series m4를 사용하여 3차원 모델링 및 정적 구조해석을 수행하였다.

유한요소 해석의 절차는 전처리(Pre-process), 해석(Solve), 후처리(Post-process)로 나뉘는데 전처리(Pre-process)에서는 해석할 모델의 형상으로부터 절점과 요소를 생성하고 재료의 물성치 입력 및 해석 조건을 설정하였다. 또한 후처리는 해석결과를 출력하여 등가응력과 전체 변형량을 확인하여 해석 결과를 분석하였다.

Mesh의 구성에 따라 조금 더 정확한 결과 값을 얻을 수 있으므로 다음과 같은 작업은 아주 중요하다.

Table 1. Mechanical properties of ATOS80

Property	Value
Yield strength	700MPa
Tensile strength	780MPa
Elongation	14%

10-Node Tetrahedron 요소를 사용하였으며, 해석에 사용된 절점의 수는 약 116,000개, 요소의 수는 186,000개이다. 이 해석에서 사용된 주재료는 용접구조용 압연강재인 ATOS80이며, 재료의 물성치는 Table 1에 표기하였다.

#### 가. 경계조건 및 하중조건

브래킷의 상판 외형치수는 252mm×120mm이며 높이는 42mm이다. 브래킷의 구조상의 취약점이 나타나는 최대 작용력은 580Kgf이고 이것은 최대 작업 하중이 작용할 때의 것이다. 본 연구에서는 이를 하중조건으로 이용하였다. 구조 해석에서는 모델의 단순화를 위해서 브래킷의 끝단에 크레인의 회전에 의해 발생하는 힘을 직접적으로 작용시켰다.

그리고 브래킷과 상부 플레이트가 결합되는 부분은 볼트로 고정되어 결합된다. 따라서 브래킷과 상부 플레이트가 고정되는 결합부에 모든 변위를 구속하였다.

하중조건은 브래킷의 끝단에 해당하는 위치에 최대 작용력인 580Kgf를 적용시켰다. 하중조건 및 경계조건을 Fig. 4에 표시 하였다.

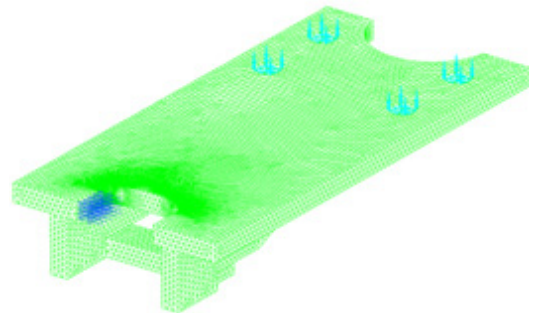


Fig. 4. FE model and boundary conditions

#### 나. 해석 및 결과

일반적으로 구조해석을 수행하는 목적으로 구조물의 유한요소 모델과 구조물의 정적특성(Static characteristic) 즉, 강성(Stiffness)과 강도(Strength)를 파악하여, 브래킷의 등가응력을 얻기 위함에 있다.

브래킷의 정적 유한요소해석 결과, 브래킷의 안쪽 라운드 부위에서 최대 응력이 발생하였고, 폰-미세스(Von-Mises)등가응력으로 119MPa이 발생하였다. 이는 안전율이 설계 목적 인 420MPa의 3.5정도로서, 브래킷은 구조설계상 안전성을 갖는 것으로 판단된다. 유한요소해석 결과를 Fig. 5에 표시 하였다.

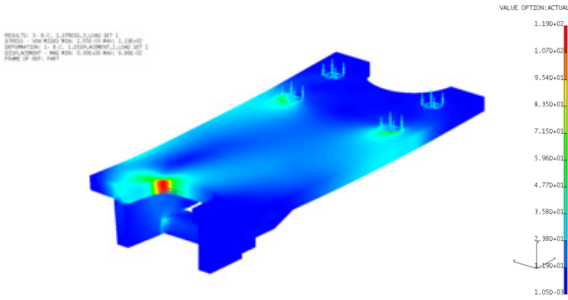


Fig. 5. Stress result of a bracket

#### 4. 구조시험

##### 가. 시험조건

구조시험은 브래킷의 구조강도 확인 및 시험결과를 해석 결과와 비교 분석을 위하여 실시하였으며, 이를 통하여 설계의 신뢰성을 확보하고자 하였다.

본 연구의 브래킷의 실규모 구조시험은 크레인 회전시 발생하는 작용력에 대한 구조강도 특성을 파악하기 위하여 Fig. 6과 같이 스트레인 게이지를 부착하여 실시하였다.

세부적 사항으로, 구조해석 결과를 참조하여 파악된 최대 응력 발생부위의 근접부에 게이지(1)을 설치하고 최대 응력이 발생하는 근처 위치에 게이지(2)를 추가로 설치하여 크레인 선회시의 등가응력을 측정하였다. 최대응력 발생부는 브래킷 홈부의 라운드 위치이지만 게이지 부착 제한으로 인하여 게이지(1)은 최대 응력 발생부의 근접위치에 부착하여 등가응력을 산출하였다.

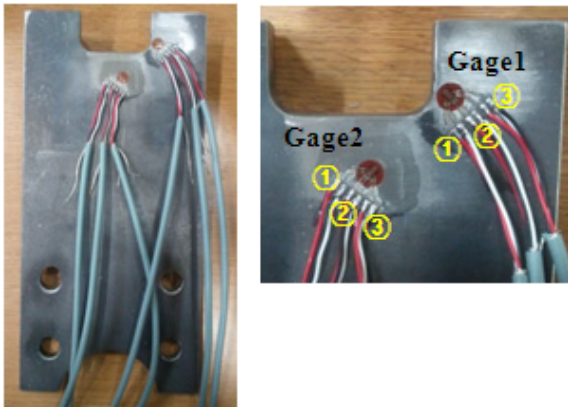


Fig. 6. Test setup condition

##### 나. 등가응력산출

등가응력 산출을 위한 데이터 처리의 시험 구성도 (Test System Architecture) 및 프로세스는 Fig. 7과 같다. 3축 로제트 스트레인 게이지(Rosette Strain Gauge)에서 측정된 변형률(Strain)로부터 최종적으로 폰-미세스 항복이론(von-Mises Criterion Theory)에 근거하여 등가응력 산출하였다<sup>[2]</sup>.

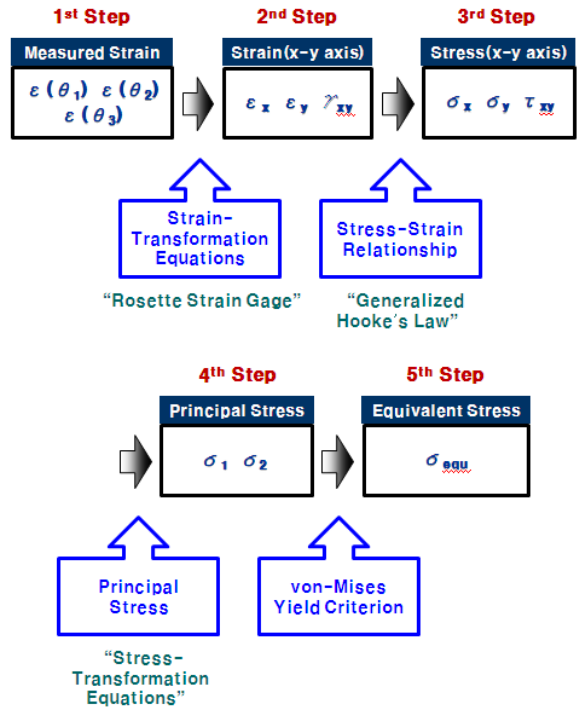


Fig. 7. Flow chart of equivalent stress computation

1단계로, 3축 로제트 스트레인 게이지 적용하여 3축 변형률을 측정하였고, 데이터의 처리는 데베트론 (DEWETRON) 계측장비 활용하여 다음 식과 같이 적용하였다.

$$\epsilon_o = \frac{E}{4} K_s \epsilon_o$$

2단계로, 각 축별로 측정된 수직변형률 값을 다음과 같은 변형률 변환식(Strain-Transformation Equation)에 적용하여 축방향 변형률 산출하였다.

$$\epsilon(\theta_1) = \epsilon_x \cos^2\theta_1 + \gamma_{xy} \sin\theta_1 \cos\theta_1 + \epsilon_y \sin^2\theta_1$$

$$\varepsilon(\theta_2) = \varepsilon_x \cos^2\theta_2 + \gamma_{xy} \sin\theta_2 \cos\theta_2 + \varepsilon_y \sin^2\theta_2$$

$$\varepsilon(\theta_3) = \varepsilon_x \cos^2\theta_3 + \gamma_{xy} \sin\theta_3 \cos\theta_3 + \varepsilon_y \sin^2\theta_3$$

3단계로, 각 축별로 산출된 변형률 값에 다음 식의 응력-변형률 관계식(Stress-Strain Relationship)을 적용하여 축방향 응력을 산출하였다.

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E} [\sigma_x - \nu(\sigma_y + \sigma_z)] + \alpha \cdot \Delta T, \quad \gamma_{xy} = \frac{\tau_{xy}}{G}$$

$$\varepsilon_y = \frac{1}{E} [\sigma_y - \nu(\sigma_z + \sigma_x)] + \alpha \cdot \Delta T, \quad \gamma_{yz} = \frac{\tau_{yz}}{G}$$

$$\varepsilon_z = \frac{1}{E} [\sigma_z - \nu(\sigma_x + \sigma_y)] + \alpha \cdot \Delta T, \quad \gamma_{zx} = \frac{\tau_{zx}}{G}$$

4단계로, 각 축별로 산출된 응력 값에 주응력(Principal Stress) 관계식을 적용하여 주응력을 산출하였다.

$$\tan 2\theta_p = \frac{2\tau_{xy}}{\sigma_x - \sigma_y} \Rightarrow \theta_p = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left( \frac{2\tau_{xy}}{\sigma_x - \sigma_y} \right)$$

$$\sigma_1 = \sigma(\theta = \theta_p) = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} + \sqrt{\left( \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \right)^2 + \tau_{xy}^2}$$

$$\sigma_2 = \sigma\left(\theta = \theta_p + \frac{\pi}{2}\right) = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} - \sqrt{\left( \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \right)^2 + \tau_{xy}^2}$$

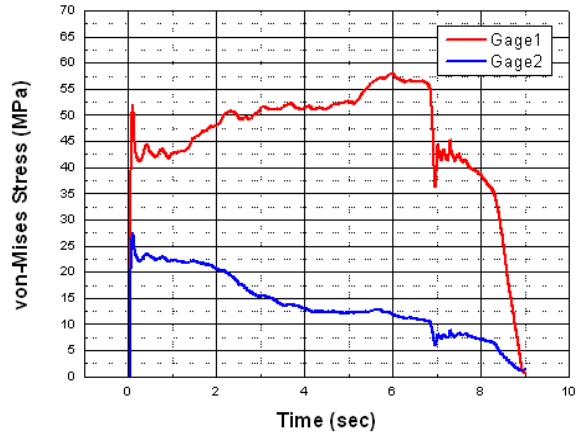
마지막으로, 항복 기준을 해석 기준과 동일한 폰-미세스 항복조건(Von-Mises Yield Criterion)으로 선정하기 위하여 산출된 주응력 값에 폰-미세스 항복(Von-Mises Yield) 관계식인 식 (5)를 적용하였다.

$$\sigma_{equ} = \sigma_{eff} = \bar{\sigma} = \sqrt{\frac{1}{2} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]}$$

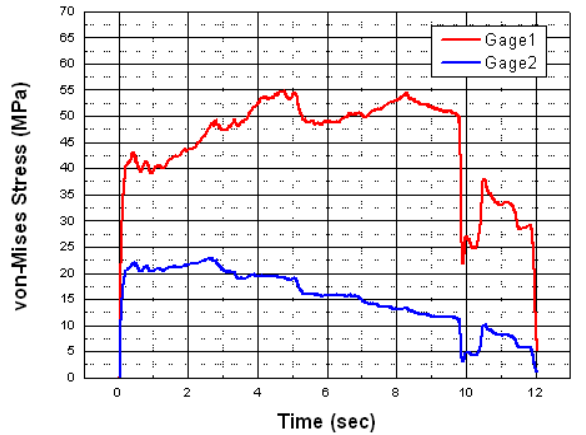
다. 결과 및 고찰

브래킷의 실제 하중조건에 의한 측정결과는 아래와 같다. 구조시험은 총 3회에 걸쳐 진행되었고, 결과를 Fig. 8에 등가응력과 시간의 그래프로 나타내었다.

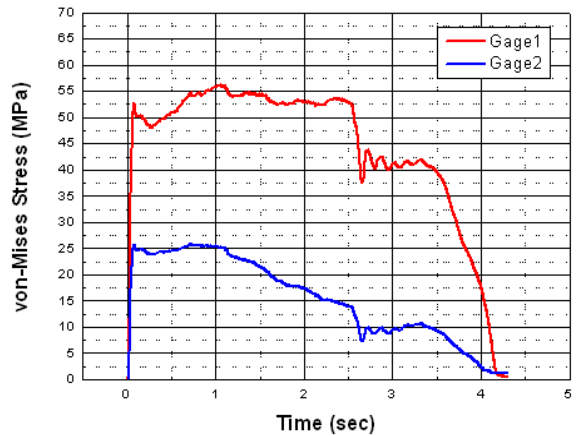
브래킷에 운행기간 동안 비교적 안정적인 하중이 작용하는 것을 알 수 있다. 또한, 응력 발생 경향은 구조해석 결과와 비슷한 경향을 나타내는 것을 알 수 있다.



(a) 1st load test result



(b) 2nd load test result



(c) 3rd load test result

Fig. 8. Stress results by structural test

마지막으로, 브래킷의 설계 시 사용된 유한요소해석의 타당성을 평가하기 위하여, 앞서 시행한 구조시험 결과와 유한 요소 해석결과를 비교하였다. 비교 부위는 구조시험에서 측정한 부위와 동일한 부위를 유한요소 해석결과(Fig. 5)에서 선정하여 등가응력에 대하여 비교하였다.

Table 2에 구조시험 및 유한요소 해석을 통한 비교 결과를 나타내었다. 구조시험의 결과의 평균은 게이지 (1)에서 52.7MPa, 게이지 (2)에서 28.1MPa이었고, 해석 결과는 각각 56.1MPa, 25.1MPa 이었다.

이의 구조시험결과와 유한요소해석 결과와의 비교를 통하여 알 수 있듯이 시험결과 값에 대한 해석결과 값의 오차가 7~11% 수준으로서, 일반적인 해석을 기준으로 할 때 양호한 결과로 간주할 수 있으며, 경향 또한 유사하게 나타났다.

따라서 본 연구에서 브래킷의 구조해석 및 설계 시 적용한 유한요소해석의 해석방법 및 결과는 타당하다고 판단된다.

Table 2. Comparison of measured and simulated results

	Measured results				Simulated results	Ratio of error (%)
	von-Mises Stress(MPa)				von-Mises Stress (MPa)	
	1차	2차	3차	평균		
Gage1	53.5	53.3	51.4	52.7	56.7	7.5
Gage2	28.3	28.3	27.8	28.1	25.1	10.8

## 5. 결론

본 연구는 구난크레인 브래킷의 구조건전성을 평가하기 위하여 유한요소 해석 및 실제 장비를 대상으로 구조시험을 수행하였으며 이에 얻어진 결과는 다음과 같다.

- (1) 구난크레인 브래킷의 설계 목적 값으로 얻어진 등가응력은 420MPa이며, 유한요소해석을 통해 얻어진 최대응력은 119MPa이므로 설계 목적보다 Strength ratio가 3.5로 충분히 커서 안전함을 알 수 있었다.
- (2) 브래킷의 실규모 구조시험을 통하여 크레인 회전 시 발생하는 작용력에 대한 구조강도 특성을 파악하였고, 해석결과와 비교분석 할 수 있었다.
- (3) 구조해석 결과를 참조하여 파악된 최대 응력 발생 부위의 근접부에 스트레인 게이지를 부착하여 등가응력을 산출하였고, 안정적인 하중이 작용하는 것을 알 수 있었다.
- (4) 유한요소해석과 구조시험을 통하여 도출된 결과는 양자가 거의 일치하였고, 경향 또한 유사하게 나타내어 구조해석의 결과는 적합하다고 판단된다.

## References

- [1] DoosanDST, “Crane Developed Complete Report”, 2010.
- [2] Goto Manabu, “Theory of Plasticity or Mechanics of Plastic Materials, Corona Publish CO., LTD, 2001.
- [3] DTaQ, “The Report on the Next Generation Rescue Armored Vehicled Crane Structure(Strength/Endurance Analysis”, 2010.